Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 4. 2024. (19-44)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

The Effect of the Rolling Process on the Properties of Materials Produced by Additive Manufacturing (3D printing) *

Review Paper

Seied Meisam Sharif Mosavi[1], Farshad Nazari[2], Reza Mosalmani[3]

DOI: 10.22067/jmme.2024.89703.1156

1-Introduction

The rolling process is one of the common and widely used methods in manufacturing and forming various parts. The rolling process has a significant effect on the mechanical properties and microstructure of materials, which making it important in the manufacturing of products. 3D printing or additive manufacturing is a of the new method in producing parts that allows for the direct creation of parts from digital models. This process is based on creation parts layer by layer and can produce various parts quickly and with high precision. The unique features of additive manufacturing, such as design freedom, no need to dies and auxiliary equipment, and the ability to produce complex and integrated parts, have caught the attention of many industries such as aerospace, oil and gas, marine and automotive industries to use this method. In the other hand, problems such as microstructure defects, distortion, residual stress and anisotropy of mechanical properties are among the challenges in additive manufactured or 3D printed parts. Using the rolling process to modify 3D printed parts is one way to improve the microstructure and mechanical properties of materials. By combining the rolling process with additive manufacturing, hardness, strength, and elongation can be increased by homogenizing and refining grains of the structure. Also, this process can reduce distortion and residual stress in the additive manufactured parts.

2-The effect of the rolling process on parts produced using methods other than 3D printing

Rolling is an essential process in the production and shaping of materials, particularly metal materials. During this process, the raw material passes between two or more rollers, resulting in alterations to the geometry, mechanical properties, and microstructure of the material. This process can be divided into three categories: cold rolling, warm rolling and hot rolling based on temperature. Cold rolling is performed at ambient temperature, warm rolling is done at a temperature below the recrystallization temperature, and hot rolling is performed at a temperature above the recrystallization temperature of the raw material. Investigating the effect of the rolling process on the mechanical properties and microstructure of materials produced through traditional processes reveals that the rolling process cause to an increase in hardness and strength, as well as a transformation of the microstructure into fine grains. Figure 1 illustrates the schematic of the rolling process.

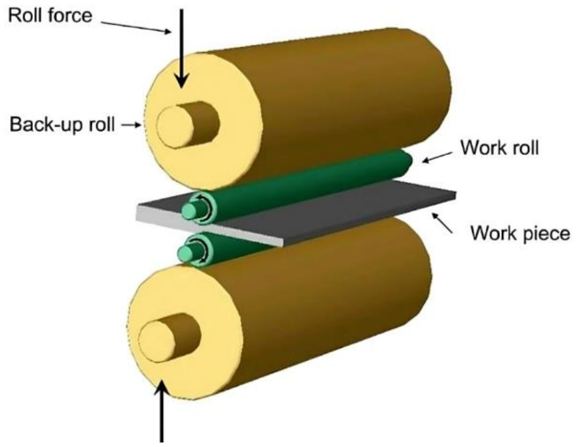


Figure 1: Schematic of the rolling process, including the workpiece, rolling rollers and support rollers

3- Rolling process related to parts produced by 3D printing method

With the growing popularity of 3D printed materials, it is important to examine and understand the effect of the rolling process on the parts created using this method.

*Manuscript received September 7, 2024, Revised September 22, 2024, Accepted October 20, 2024.

[1] MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

[2] Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. **Email**: f.nazari@scu.ac.ir

[3] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

There are various methods for additive manufacturing of metal parts, including selective laser melting (SLM), wire and arc additive manufacturing (WAAM), etc. The following discusses studies conducted on the effect of the rolling process on parts made by the additive manufacturing method.

3-1- Rolling configurations in 3D printing and hybrid mechanisms

In 2013, Zheng et al. presented a transformative mechanism for the WAAM process. This mechanism features a unique rolling system with three rollers, that can be configured based on the part's characteristics to roll either the top or side surfaces of the deposit (Figure 2). In this research, the study focused on the effect of rolling force and temperature on the shape of the printed layer. The goal was to determine the optimal rolling parameters that could effectively control the height and width of the layers. Rodrigues et al. emphasized the significance of roller design in the interlayer rolling method. They suggested that the geometry of the roller placement should be tailored to the characteristics of the part, such as thickness, to ensure the achievement of homogeneous fine grains. In this study, the WAAM process and Ti-6Al-4V alloy were utilized.

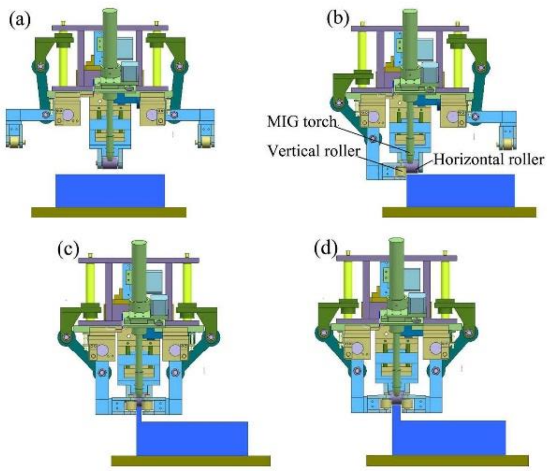


Figure 2: Simulation of metamorphic rolling mechanism for different work condition, (a) one roller, (b) two rollers, (c) three rollers for thin wall with thickness of 6 mm, (d) three rollers for thin wall with thickness of 10 mm

Michel et al investigated ring rolling as a flexible forming process to produce seamless rings of various dimensions and cross-sections. Figure 3 shows the completed design, which includes a rolling table with four mandrels. It should be noted that sometimes different parts may require multiple forming steps to achieve the final geometry. To improve the flexibility of the process, it is beneficial to utilize high-efficiency additive manufacturing methods like WAAM in the ring rolling process. This method offers the opportunity to work on various materials at a high deposition rate. In this case, more complex sections can be produced with just one ring rolling step. Upon examining the results, it is evident that WAAM pre-forms exhibited good forming behavior did not develop any surface defects. Also, The defects within the rings did not have any negative effect on the rolling process. The condition of the surface, whether raw or machined, does not affect the forming behavior. The combination of WAAM and ring rolling appears to be feasible in achieving the goals of enhancing process efficiency and reducing costs.

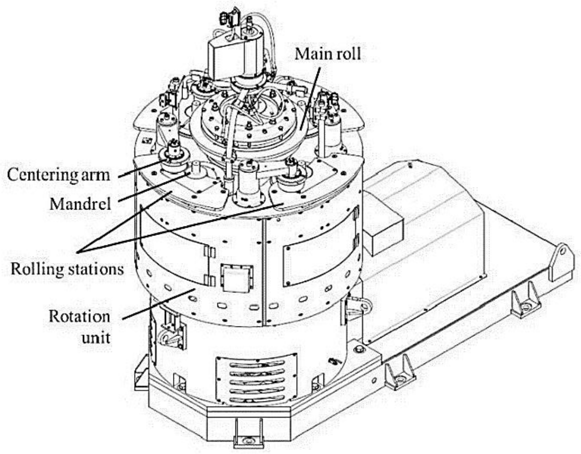


Figure 3: Scheme of the ring rolling automated machine

3-2- Process repeatability

In their research, Martina et al. used the WAAM method to print a piece of Ti-6Al-4V material. They then rolled each layer of the print between passes using the high-pressure rolling method. They demonstrated that rolling the samples in this manner improved the repeatability of the production process, which could aid in the industrial implementation of the process.

3-3- Mechanical properties, microstructure, defects

Zheng et al. demonstrated that utilizing the combined deposition and rolling method can be beneficial for achieving fine graining, preventing hot cracking and enhancing the mechanical properties of parts (refer to Figure 4). Guo et al pointed out that the rolling process improves the fine-grained structure and also increases hardness. Therefore, the mechanical properties of the produced alloy are enhanced when using the WAAM method. Martina et al. proved that applying the rolling process to steel structures produced by the WAAM method, can reduce grain size. The results obtained from this research show that rolling significantly improves the grain refining process, reduces the overall thickness of the layers, and changes the microstructure from a completely columnar state to an axial one. This change is the reason for the recrystallization of the deformed layer during the deposition and melting of the next layer. Wu et al showed that when WAAM process is utilized, the thermal gradient

of the deposition layers and the alternating heating and cooling process result in improved microstructural evolution and mechanical properties of the target part. The cold rolling technique significantly reduces microstructural anisotropy by subjecting the deposits to intense plastic deformation. Interpass cold rolling can also play an important role in reducing hydrogen porosity in aluminum parts manufactured using WAAM process. Maleki et al. have stated that selecting appropriate parameters for the rolling operation can enhance the grain refining process and induce compressive residual stresses in the treated layer. These characteristics can result in improved mechanical properties and decreased surface roughness. Different approaches have been examined to utilize rolling in managing the microstructure of layers on additive manufactured metals, such as performing a rolling pass on the outer surface/finish layer or using interpass rolling.

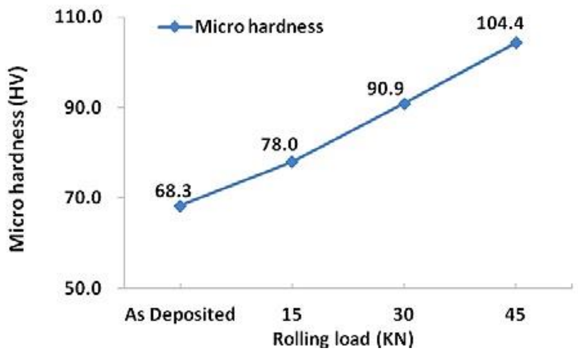


Figure 4: Average microhardness of rolled WAAM ER2319 with increasing rolling load

3-4- Distortion and residual stress

Gu et al. demonstrated that the strength of the alloy is indeed enhanced after heat treatment. However, the main issue lies in controlling distortion. Therefore, inter-pass cold rolling was also applied to the process. This was able to significantly reduce the maximum residual stress. With the help of this process, distortion can be reduced or even eliminated. Martina et al. showed that high-pressure rolling, originally used for welding, is a mechanical stretching method used in manufacturing. In this process, a moving roller applies the load. If the load is sufficient to cause severe plastic compression of the surface in the normal direction, plastic stretching occurs in the direction of rolling, thus reducing the longitudinal residual stresses. In another study, researchers applied high-pressure rolling to each layer of a part produced with Ti-6Al-4V material using the WAAM method in an interpass manner. In the rolled samples, the out-of-plane distortion was reduced by half. Honnige et al noted that rolling can help control residual stress and distortion in aluminum parts made using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process. In this research, rolling was applied vertically on each sediment layer (interpass) and after the completion of the sediment. Distortion is virtually eliminated by the vertical interpass method unlike with other metals, and can be reversed by lateral rolling. Vertical interpass rolling eliminates distortion, but results in a multidirectional stress field. This includes hydrostatic compressive stresses with approximately 2 mm depth and hydrostatic tensile stresses 5-10 mm depth below the surface.

3-5- Geometry of particles

In their research, Martina et al. applied high-pressure rolling to each layer of a Ti-6Al-4V manufactured component using the WAAM method. In the rolled samples, a change in the sediment's geometry was observed due to plastic deformation. This resulted in an increase in the wall width and a decrease in the layer height. Rolling significantly reduces The standard deviation of layer height, making the WAAM process easier.

3-6- Composite materials and new concepts

In 2019, Zhao et al. conducted research on an innovative method for creating titanium/steel clad plates. Instead of using Ti sheets, pure titanium powder was initially deposited onto steel plates using Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM) (Figure 5). The titanium/steel clad plates were then fully coupled by hot rolling and annealing. The mechanical properties of these plates were evaluated at various stages of production through a series of tensile and shear tests. It was found that the titanium/steel coated plates had an excellent shear strength of 280 MPa, ultimate tensile strength of 564 MPa, and a suitable elongation of 18%.

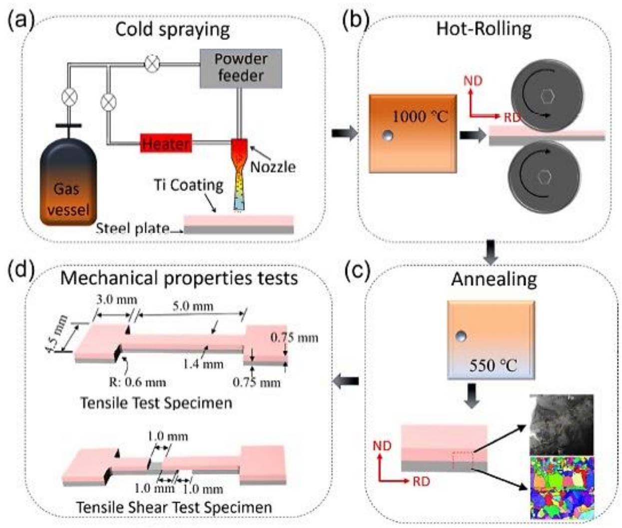


Figure 5: Schematic representation of (a) cold spraying of Ti on steel plate, (b) hot-rolling process, (c) annealing process, and (d) sample dimensions for tensile and shear tests.

4-conclusions

In this review article, research conducted on the effects of the rolling process on mechanical properties, microstructure, residual stress and crack growth in materials produced by additive manufacturing has been investigated and various 3D printing-rolling hybrid processes have been introduced and examined. The results of this research are summarized as follows:

- The strength of 3D printed parts increases through the rolling process. It is caused to increase tensile strength and reduced flexibility.
- The rolling process can be effective in grain refining and improving the microstructure of materials produced by additive manufacturing. It can convert the material from a completely columnar state to a coaxial one, and to some extent reduce structural defects and porosity in the structure.
- Various rolling methods, such as high-pressure rolling and interpass rolling, can greatly reduce residual stress and distortion in materials produced using additive manufacturing processes.
- Compared to the typical additive manufacturing methods, parts made using a combination of deposition and rolling exhibit better surface quality, flatter geometry and significantly less dimensional fluctuation.
- The design of rollers plays a crucial role in the interlayer rolling method. The placement geometry of the rollers should be carefully designed based on the characteristics of the part. This will help create the desired properties in the 3D printed parts.
- The hybrid method of additive manufacturing-rolling is effective and useful for grain refining, preventing the formation of defects like cracks, and enhancing the mechanical properties of parts. Additionally, it reduces distortion and residual stress in parts produced by 3D printing.

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

تأثیر فرایند نورد بر خواص مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی (پرینت سه‌بعدی): مقاله مروری*

مقاله مروری

سید میثم شریف موسوی(۱) فرشاد نظری(۲) رضا مسلمانی(۳)

DOI: 10.22067/jmme.2024.89703.1156

چکیده فرایند نورد از روش‌های رایج و پرکاربرد در تولید و شکل دهی قطعات مختلف می‌باشد. فرایند نورد خـواص مکـانیکی و ریزسـاختار مـواد را تحـت تأثیر قرارداده که این امر در تولید محصولات اهمیت فراوانی دارند. چاپ سه‌بعدی یا ساخت افزایشی از روش‌های جدید در تولیـد قطعـات محسـوب شـده کـه توانایی ساخت قطعات را به طور مستقیم از روی مدل‌های دیجیتال داد. این فرایند مبتنی بر ساخت قطعات بصورت لایه لایه بوده و می‌تواند قطعـات مختلـف را در زمان کوتاه و با دقت بالا تولید نماید. ویژگی‌های منحصر به فرد روش ساخت افزایشی مانند آزادی در طراحی، عدم نیاز به قالب و تجهیـزات کمکـی، تولیـد قطعات پیچیده و یکپارچه‌سازی قطعات موجب توجه بسیاری از صنایع مانند هوافضا، نفت و گاز، صنایع دریایی و خودرو به استفاده از این روش تولیـدی شـده است. البته مشکلاتی مانند وجود عیوب ساختاری، اعوجاج، تنش پسماند و ناهمسانگردی خواص مکانیکی مـواد از چـالش‌هـای موجـود در تولیـد افزایشـی یـا پرینت سه‌بعدی قطعات محسوب می‌شود. استفاده از فرایند نورد جهت اصلاح قطعات پرینت سه‌بعدی شده، یکی از روش‌هـای بهبـود میکروسـاختار و خـواص مکانیکی مواد می‌باشد. استفاده از ترکیب فرایند نورد و ساخت افزایشی می‌تواند با همگن سازی و ریزدانه‌کردن ساختار ماده سـبب افـزایش سـختی و اسـتحکام شده و قابلیت افزایش طول را نیز بهبود بخشد. همچنین این فرایند توانایی کاهش اعوجاج و تنش پسماند را در قطعات تولید شده با روش ساخت افزایشی دارد.

واژه‌های کلیدی نورد، پرینت سه‌بعدی، ساخت افزایشی، خواص مکانیکی، ریزساختار، تنش پسماند.

The Effect of the Rolling Process on the Properties of Materials Produced by Additive Manufacturing (3D printing): a Review Paper

Seied Meisam Sharif Mosavi Farshad Nazari Reza Mosalmani

Abstract *The rolling process is one of the common and widely used methods in manufacturing and forming various parts. The rolling process has a significant effect on the mechanical properties and microstructure of materials, which making it important in the manufacturing of products. 3D printing or additive manufacturing is a of the new method in producing parts that allows for the direct creation of parts from digital models. This process is based on creation parts layer by layer and can produce various parts quickly and with high precision. The unique features of additive manufacturing, such as design freedom, no need to dies and auxiliary equipment, and the ability to produce complex and integrated parts, have caught the attention of many industries such as aerospace, oil and gas, marine and automotive industries to use this method. In the other hand, problems such as microstructure defects, distortion, residual stress and anisotropy of mechanical properties are among the challenges in additive manufactured or 3D printed parts. Using the rolling process to modify 3D printed parts is one way to improve the microstructure and mechanical properties of materials. By combining the rolling process with additive manufacturing, hardness, strength, and elongation can be increased by homogenizing and refining grains of the structure. Also, this process can reduce distortion and residual stress in the additive manufactured parts.*

Keywords Rolling process, 3D printing, Additive manufacturing, Mechanical properties, Microstructure, Residual stress

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۶/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۲۹می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

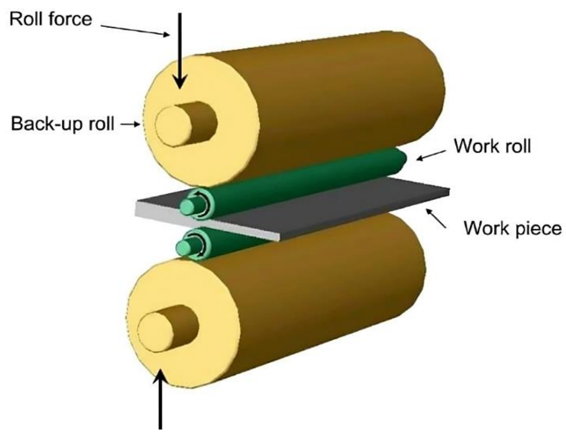
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

Email: F.nazari@scu.ac.ir

تأثیر فرایند نورد بر قطعات تولیدی با روش‌های غیر از پرینت سه‌بعدی

نورد از فرایندهای مهم در تولید و شکل‌دهی مواد، به خصوص مواد فلزی می‌باشد. در این فرایند ماده اولیه از بین دو یا چند غلتک عبور می‌کند که سبب تغییر در هندسه، خواص مکانیکی و ریزساختار ماده می‌گردد. این فرایند را می‌توان بر حسب دما به سه دسته نورد سرد، گرم و داغ تقسیم‌بندی کرد. نورد سرد در دمای محیط انجام می‌شود، نورد گرم در دمای زیر دمای تبلور مجدد و نورد داغ در دمای بالای دمای تبلور مجدد ماده اولیه انجام می‌شود [1]. شماتیک فرایند نورد در شکل (۱) ارائه شده و در ادامه به بررسی تعدادی از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.



شکل ۱ شماتیک فرایند نورد، شامل قطعه‌کار، غلطک‌های نورد و غلطک‌های پشتیبان [2]

کیم و همکارانش [3] نورد نامتقارن را با نورد معمولی مقایسه کردند. آنها برای تجزیه و تحلیل کرنش ایجاد شده از روش پراش الکترونی برای بررسی ریزساختارها، با تمرکز بر گسترش جهت‌گیری دانه‌ها (GOS) استفاده کردند. نتایج نشان داد نورد نامتقارن جهت الیاف ماده مورد بررسی را ۵ تا ۱۰ درجه جابه‌جا کرد و انعطاف‌پذیری را بدون کاهش استحکام افزایش داد. کیم و همکارانش [4] همچنین در پژوهشی دیگر، به کمک فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید با استفاده از روش نورد سریع دیفرانسیلی (DSR) موفق به تغییر شکل ورق آلیاژی AZ91 شدند. صفحات نازکی با اندازه دانه میکرونی و با خاصیت ایزوتروپیک مسطح در نتیجه این فرایند ایجاد شد. ورق‌ها استحکام بالایی با تنش تسلیم حدودا ۳۲۷ مگاپاسکال و شکل‌پذیری یا ازدیاد طول ۹ تا ۱۱ درصد را نشان دادند. در مقایسه با فرایندهای پرس در کانال مساوی زاویه‌دار (ECAP) و نورد تجمعی (ARB)، DSR استحکام و شکل‌پذیری بالاتری را ارائه می‌دهد. یو و همکارانش [۵] ورق‌های تیتانیم با استحکام بالا (۸۹۵–۹۱۵ MPa) را با استفاده از نورد به روش DSR شکل‌دهی کردند. آنها به کمک این فرایند ضخامت را تا ۶۳ درصد در یک پاس کاهش دادند. این فرایند نوارهای برشی یکنواختی را تشکیل داد که منجر به دانه‌های بسیار ریز با اندازه ۰/۱ تا ۰/۳ میکرومتر شد. ورق‌های تیتانیوم نورد شده استحکام کششی نهایی ۸۹۵ تا ۹۱۵ مگاپاسکال را نشان دادند. جیانگ و همکارانش [6] در پژوهش خود دریافتند که فرایند نورد نامتقارن بهبود یافته (ASR) استحکام تسلیم آلومینیوم نورد شده را تا حد زیادی افزایش می‌دهد و در نتیجه دانه‌های بسیار ریز با مرزهای زاویه‌دار را ایجاد می‌کند. لی و همکارانش [7] ریزدانه‌های تیتانیوم با اندازه دانه متوسط ۸۰ نانومتر را با استفاده از نورد نامتقارن و متقارن در دمای اتاق تولید کردند. سپس تأثیر فرایند آنیلینگ را بر روی آنها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه بررسی کردند. در نتیجه تیتانیم با دانه‌بندی فوق العاده ریز با اندازه دانه کمتر از ۲۰۰ نانومتر به دست آمد که نشان دهنده پایداری حرارتی نسبتا خوب است. تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) جهت‌گیری‌های مشخصی را در امتداد صفحات کریستالی نشان داد، که با دمای آنیل بالاتر شدت جهت‌گیری کمی کاهش یافت. هوانگ و همکارانش [8] جهت بررسی آلیاژ منیزیم AZ80 با قابلیت عملیات حرارتی، از روش نورد DSR با کاهش ضخامت ۳۳ درصد در هر پاس استفاده کردند. ورق نورد شده با این روش استحکام کششی ۳۲۹ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲۵٪ را نشان داد. جان و همکارانش [9] فرایند نورد سطحی اولتراسونیک (USRP) را به عنوان یک روش جدید بررسی کردند. USRP یک فرایند جدید تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) است که طی آن فرایندهای پینینگ اولتراسونیک (UIP) و نورد عمیق (DR) را برای بهبود یکپارچگی سطح و خواص مکانیکی مواد با هم به کار می‌گیرد. این فرایند گرادیان لایه‌های سطحی نانوساختار را تحریک می‌کند و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد و از شکست مواد جلوگیری می‌کند. در این پژوهش نتایج مربوط به متریال‌های مختلف ارائه شدند. استپانف و همکارانش [10] ریزساختار و خواص مکانیکی مس پس از ۱ تا ۱۰ پاس فرایند ECAP را با فرایند نورد سرد بر روی این متریال مقایسه کردند. نورد باعث تبدیل ساختار مس از هم محور به لایه‌ای بدون ریزتر کردن

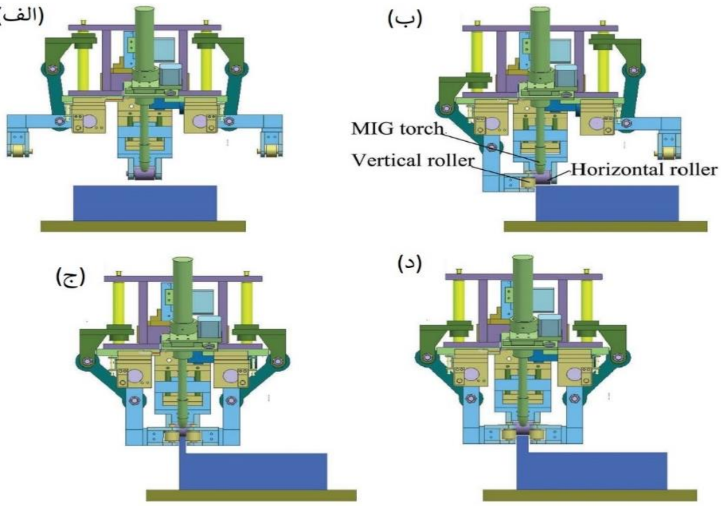
دانه‌ها شد. همچنین منجر به گسترش مرزهای با زاویه زیاد و بهبود ساختار تشکیل شده گردید. خیری و همکارانش [11] خواص کششی فولاد ضد زنگ AISI 316L نورد سرد را پس از انجام فرایندهای مختلف مانند تبدیل کامل فاز مارتنزیت به آستنیت، تبلور مجدد آستنیت باقی مانده و رشد دانه در دماهای مختلف از ۸۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، بررسی کردند. نتایج نشان داد که دماهای بالاتر فرایندهای برگشت و تبلور مجدد را تسریع می‌بخشند، اما منجر به دانه‌های درشت‌تر در پایان تبلور مجدد می‌شوند. کاهش دمای آنیل در طول تبلور مجدد کامل، تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی را افزایش داد، در حالی که ازدیاد طول کل را کاهش داد. جالب توجه است که وابستگی تنش تسلیم به اندازه دانه بیشتر از استحکام کششی نهایی است، که احتمالا به دلیل بهبود رفتار سخت‌شدگی و انعطاف‌پذیری ناشی از تبدیل با اندازه دانه درشت‌تر است. رن و همکارانش [12] در پژوهش عملی خود خواص مکانیکی آلیاژ Inconel 718 را با استفاده از روش نورد سرد دو مرحله‌ای، شامل نورد سرد اولیه، فرایند آنیلینگ میانی، نورد سرد ثانویه و عملیات پیری بهبود دادند. چن و همکارانش [13] ورق‌های آلیاژی Mg-5Zn-1Mn را به کمک نورد با نرخ کرنش بالا (HSRR) در دماهای بین ۲۵۰ درجه سانتی گراد تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد تولید کردند. آن‌ها ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌های نورد شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بارش دینامیکی نقش مهمی در تکامل ریزساختاری و خواص مکانیکی دارد. هی و همکارانش [14] آلیاژهای بور آهن حاوی مقادیر مختلف تیتانیوم را با استفاده از روش ذوب القایی خلأ (VIM) تولید کردند. آلیاژها دارای خواص مکانیکی ضعیف، به ویژه از لحاظ شکل‌پذیری بودند. فرایند نورد گرم برای بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی استفاده شد. تجزیه و تحلیل ریزساختار نشان داد که نورد گرم باعث کاهش اندازه و بهبود توزیع تقویت‌کننده‌ها می‌شود. آزمایش مکانیکی، بهبود استحکام کششی و ازدیاد طول را نشان داد، در حالی که استحکام تسلیم بدون تغییر باقی ماند. افزایش میزان تیتانیوم در ابتدا باعث کاهش جزئی و سپس افزایش استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم شد. ونگ و همکارانش [15] تأثیر کاهش ضخامت ناشی از نورد و عملیات آنیل بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم AA5052 را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش، کاهش بیشتر ضخامت باعث ازدیاد طول دانه‌های هم‌محور می‌شود که منجر به افزایش استحکام اما کاهش انعطاف‌پذیری می‌گردد. هدایتی و همکارانش [16] تأثیر کاهش ضخامت‌های مختلف از طریق نورد سرد را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ AISI 304L تحلیل کردند. نورد سرد در دمای ۰ $^{\circ}C$ با کاهش ۱۰ تا ۹۰ درصدی ضخامت منجر به تشکیل فاز مارتنزیت ناشی از کرنش و افزایش استحکام شد. یافته‌های تجربی با مدل اولسن ـ کوهن هم‌راستا شدند و بر افزایش استحکام به وجود آمده صحه گذاشتند. پنیگراهی و جایاگانتان [17] اثر دمای نورد بر خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس پژوهش انجام شده نورد شدید آلیاژ در نیتروژن مایع و دمای اتاق نشان داد که آلیاژ کرایورول شده دارای استحکام بالاتر در حدود ۲۵۷ مگاپاسکال در مقایسه با آلیاژ نورد شده در دمای اتاق با استحکام ۲۳۲ مگاپاسکال به دلیل چگالی نابه‌جایی بالاتر است (کرایورلینگ یک فرایند نورد ساده در دمای پایین است که در آن دمای پایین توسط نیتروژن مایع حفظ می‌شود. کرایورولینگ یک فرایند تغییر شکل مکانیکی منحصر به فرد است که با استفاده از آن می‌توان به آلیاژهایی با استحکام و شکل‌پذیری بالا دست یافت). پس از نورد انجام شده، عملیات آنیل در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه استحکام کششی و شکل‌پذیری آلیاژ کرایورول شده را بهبود بخشید. جهازی و همکارانش [18] تأثیر دمایی حرارت مجدد، درصد تغییر شکل، زمان بین پاسی و دمای نورد نهایی بر روی فولاد AISI 4130 را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. سختی، کشش و خواص ضربه‌ای نمونه‌ها اندازه‌گیری و ریزساختار آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با کنترل دقیق عملیات ترمومکانیکی، تعادل ایدئال میان استحکام و چقرمگی به دست آمد. نتایج نشان دادند که خواص مکانیکی با افزایش درصد نورد در هر پاس بهبود می‌یابد، با این حال، خواص بهینه زمانی به دست می‌آید که ترکیب مناسبی از درصد کاهش ضخامت، و گرم کردن مجدد و دمای نورد به کار گرفته شود. ون لانگ و همکارانش [19] افزایش استحکام فولاد کم کربن را از طریق تغییر شکل نورد با فولاد قرار گرفته تحت عملیات حرارتی دو فازی، بررسی و مقایسه کردند. فولادی که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته بود استحکام بالایی در حدود MPa ۷۴۰ و شکل‌پذیری خوبی را با ۱۵٪ ازدیاد طول در هنگام شکست نشان داد؛ در حالی که فولاد نورد شده استحکام MPa ۷۰۰ و ازدیاد طول زیر ۳٪ در هنگام شکست را نتیجه داد.

به طور خلاصه، بررسی تأثیر نورد بر خواص مکانیکی و ریزساختار مواد تولید شده با روش‌های عمومی تولید نشان می‌دهند فرآیند نورد سبب افزایش سختی و استحکام شده و ریزساختار ماده را به شکل ریزدانه تغییر می‌دهد [19-3].

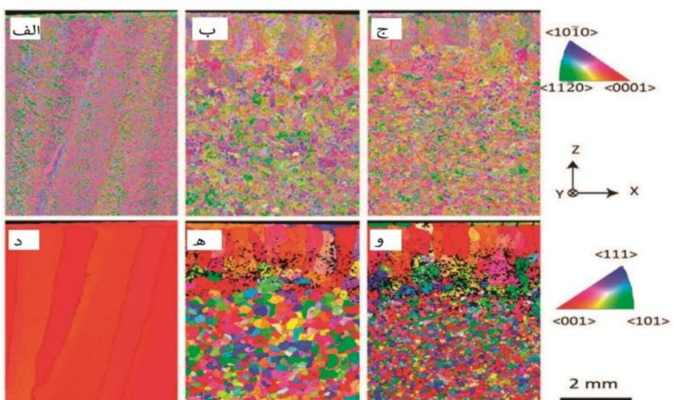
فرآیند نورد در قطعات تولید شده به روش پرینت سه‌بعدی

پیکربندی‌های نورد در پرینت سه‌بعدی و مکانیسم‌های هیبریدی. ژنگ و همکارانش [20] در سال ۲۰۱۳ یک مکانیسم دگرگونی در خصوص فرایند تولید افزایشی سیم و قوس (WAAM) را ارائه کردند که این مکانیزم دارای یک سیستم نورد جدید با سه غلتک است که پیکربندی آن همانند آنچه در شکل (۲) مشاهده می‌شود می‌تواند با توجه به ویژگی‌های قطعه نسبت به نورد کردن سطوح بالا یا جانبی رسوب تغییر کند. در این پژوهش تأثیر نیرو و دمای نورد بر شکل لایه پرینت شده، مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهای بهینه نورد برای کنترل ارتفاع و عرض لایه‌ها به دست آمد.

رودریگز و همکارانش [21] عنوان کردند که طراحی غلتک نقش مهمی در روش نورد بین لایه‌ای ایفا می‌کند و هندسه قرارگیری غلتک‌ها باید با توجه به ویژگی‌های قطعه (ضخامت و...) طراحی شود تا بتوان به ریزدانه‌های همگن رسید. آن‌ها در این مطالعه از فرایند WAAM و آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده کردند. شکل (۳) ریزساختار ماده مورد مطالعه را قبل و بعد از نورد نشان می‌دهد.



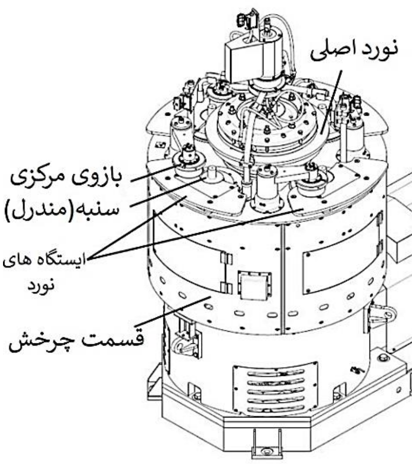
شکل ۲ شبیه‌سازی مکانیزم نورد دگرگونی در شرایط کاری و پیکربندی‌های مختلف: الف)یک غلتک، ب) دو غلتک، ج) سه غلتک برای دیواره نازک با ضخامت ۶ میلی‌متر و د) سه غلتک برای دیواره نازک با ضخامت ۱۰ میلی‌متر [20]



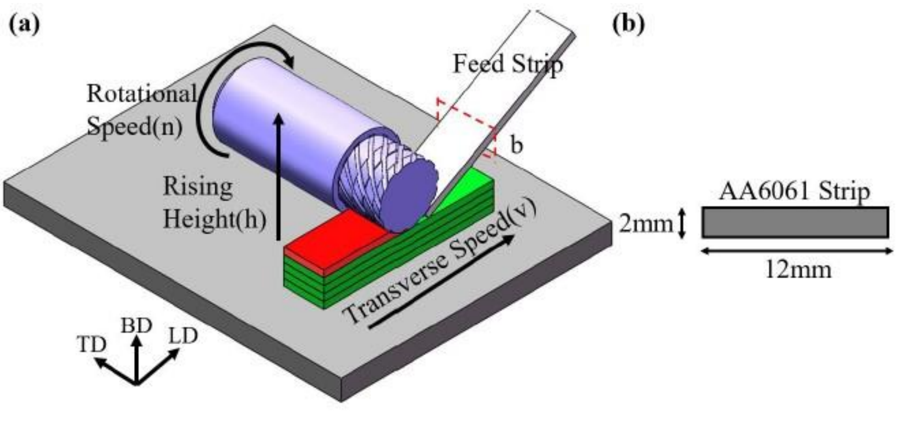
شکل ۳ نماهای پراش برگشتی الکترون (EBSD) از فاز α (الف ـ ج) و فاز β بازسازی شده (د ـ و) در نمونه‌های تولید شده بدون نورد و همراه با نورد با بارگذاری‌های KN ۵۰ و ۷۵ [21]

میشل و همکارانش [22] نورد حلقه‌ای را به عنوان یک فرایند شکل‌دهی انعطاف‌پذیر برای تولید حلقه‌های بدون درز با ابعاد و مقاطع مختلف، مورد بررسی قرار دادند. شکل (۴) طراحی انجام شده را که شامل یک میز نورد با چهار سنبه می‌باشد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است گاهی مقاطع مختلف برای رسیدن به هندسه نهایی ممکن است نیاز به چند مرحله فرم‌دهی داشته باشند. به همین دلیل برای افزایش انعطاف‌پذیری فرایند، استفاده از روش‌های پربازده تولید افزودنی مانند WAAM در فرایند نورد حلقه‌ای مفید می‌باشد. این روش امکان کار بر روی مواد مختلف با نرخ رسوب بالا را فراهم می‌کند. در این حالت، می‌توان مقاطع پیچیده‌تری را تنها با یک مرحله نورد حلقه‌ای تولید کرد. بررسی نتایج نشان می‌دهند که پیش فرم‌های WAAM رفتار شکل‌دهی خوبی داشتند و هیچ نقص سطحی روی آن‌ها ایجاد نشد. همچنین، عیوب داخل حلقه‌ها هیچ اثر منفی را بر روند فرایند نورد نشان نداد. شرایط سطح (خام یا ماشین‌کاری شده) بر رفتار شکل‌دهی تأثیری نداشت و ترکیب WAAM و نورد حلقه‌ای با اهداف بهبود کارایی فرایند و کاهش هزینه‌ها قابل اجرا به نظر می‌رسد.

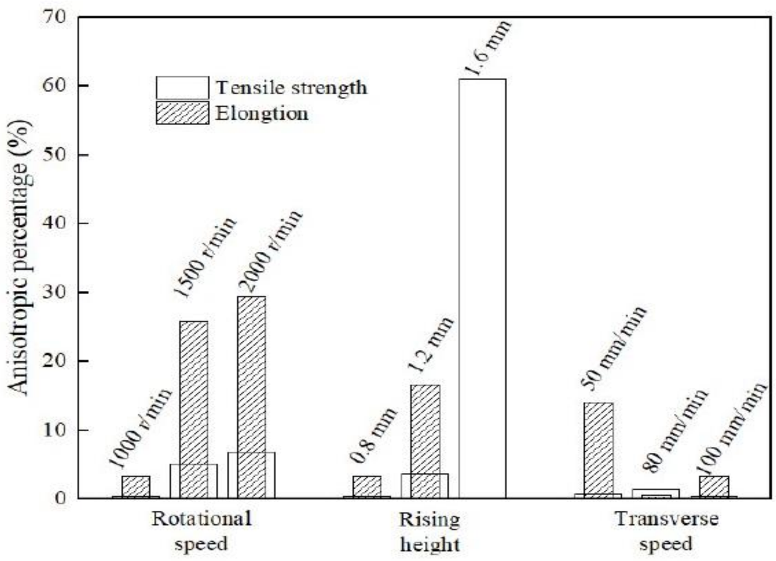
ژی و همکارانش [23] در سال ۲۰۲۳ به عنوان اولین مطالعه از نوارهای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲–H32 با ضخامت ۲ میلی‌متر به عنوان فیلر در فرایند ساخت افزودنی به روش نورد اصطکاکی (FRAM) استفاده کردند. شماتیک این فرایند در شکل (۵) قابل مشاهده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرایند از جمله افزایش ارتفاع و سرعت دورانی بر کیفیت شکل‌دهی، ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه حاصل بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب پارامترهای فرایند مناسب می‌توان از عیوب شکل‌دهی ماکروسکوپی جلوگیری کرد. در نتیجه فرایندهای انجام شده یک ریزساختار لایه‌ای غیر مسطح از دانه‌های هم‌محور ریز و فوق العاده ریز که به طور متراکم در کنار یکدیگر ادغام شده‌اند، بدون تخلخل یا نقص زیاد به دست آمد. اگر چه مواد رسوب‌شده از دانه‌های کاملا هم‌محور تشکیل نشده بودند، ناهمسانگردی خواص مکانیکی کم بود (شکل ۶). استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول در هر دو جهت طولی و جهت تشکیل مواد رسوب‌شده به دلیل ریزساختار لایه‌ای غیر مسطح و ایجاد ریزدانه‌ها، به ترتیب با حداکثر مقادیر ۲۱۵ مگاپاسکال و ۳۲ درصد بیشتر از نوارهای فیلر خام بود.



شکل ۴ طرح کلی نورد حلقه‌ای خودکار [22]



شکل ۵ a) شماتیک عملیات FRAM و b) ابعاد مقطع نوار آلومینیومی به عنوان فیلر [23]



شکل ۶ درصد ناهمسانگردی در پارامترهای مختلف در فرایند FRAM [23]

تکرارپذیری فرایند

مارتینا و همکارانش [24] در پژوهش خود یک قطعه از جنس Ti-6Al-4V را با روش WAAM پرینت کردند و با استفاده از روش نورد فشار بالا هر لایه از پرینت را به صورت بین پاسی نورد کردند. آن‌ها نشان دادند نمونه‌های نورد شده به این روش تکرارپذیری فرایند تولید را افزایش داده و این امر می‌تواند به اجرای صنعتی فرایند کمک کند.

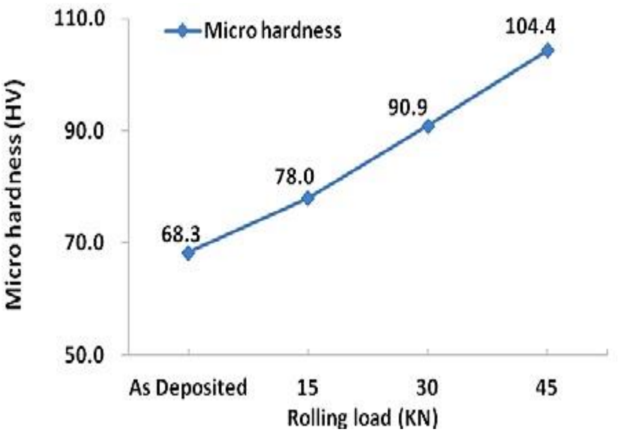
خواص مکانیکی، ریزساختار، عیوب

ژنگ و همکارانش [20] نشان دادند که روش رسوب و نورد ترکیبی برای ریزدانه‌کردن، جلوگیری از ترک داغ و بهبود خواص مکانیکی قطعات مفید خواهند بود. گو و همکارانش [25] اشاره کردند که فرایند نورد باعث بهبود فرایند ریز دانه‌کردن و همچنین افزایش سختی (شکل ۷) می‌شود، بنابراین با استفاده از روش WAAM خواص مکانیکی آلیاژ تولید شده بهبود داده می‌شود. همچنین در نتایج این پژوهش آمده است که در آینده نزدیک سیم‌های ترکیبی جدید، نورد بین پاسی و عملیات حرارتی پس از ساخت برای بهبود خواص جامع آلیاژهای آلومینیوم با به‌کارگیری روش WAAM اعمال خواهند شد. در این مقاله قطعات مورد بررسی از سیم‌های آلیاژ آلومینیوم ER2319 تولید شدند.

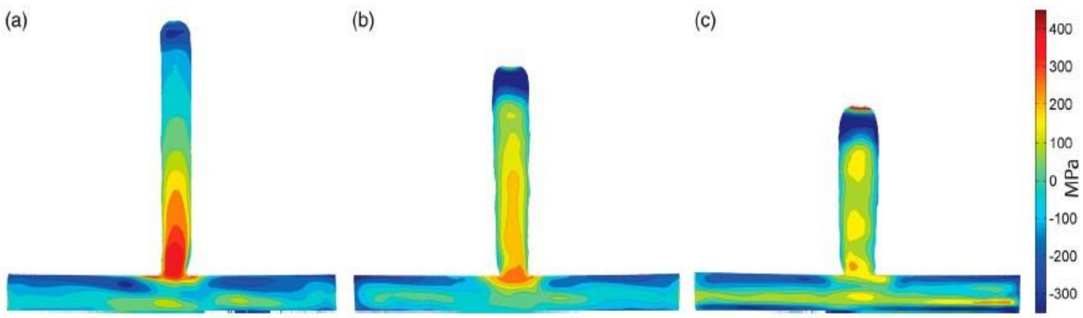
مارتینا و همکارانش [26] برای بهبود ریزساختار لایه‌های تشکیل شده، اثر نورد بین پاسی فشار بالا را مورد ارزیابی قرار دادند و در این راستا یک غلتک مسطح و یک غلتک پروفیلی را با هم مقایسه کردند. در نتیجه ریزساختار از دانه‌های بزرگ ستونی به دانه‌های هم‌محور که اندازه آن‌ها بین ۵۶ تا ۱۳۹ میکرومتر بود تغییر کردند. نتایج نشان دادند که نورد بین پاسی فشار بالا می‌تواند بر بسیاری از کاستی‌های قطعات تولید شده به روش AM غلبه کند و به طور بالقوه به اجرای صنعتی این فرایند کمک کند. در این پژوهش فرایند تولید افزودنی WAAM و متریال Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها همچنین اثبات کردند هنگامی که در سازه‌های فولادی تولید شده به روش WAAM فرایند نورد اعمال شود، این فرایند می‌تواند منجر به کاهش اندازه دانه شود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد نورد باعث بهبود قابل توجه فرایند ریزدانه کردن، کاهش ضخامت کلی لایه‌ها و تغییر ریزساختار از حالت کاملا ستونی به هم‌محور می‌شود که دلیل آن تبلور مجدد لایه تغییر شکل یافته در هنگام رسوب کردن و ذوب شدن لایه بعدی باشد. اندازه ناحیه تبلور مجدد متأثر از میزان بار و در نتیجه میزان تغییر شکل ماده قرار می‌گیرد. غلتک مسطح، که دارای مزایای عملی قابل توجهی نسبت به سایر غلتک‌ها است، کاهش‌های مشابهی را در اندازه دانه ایجاد کرد و ممکن است انتخاب بهتری برای بهره‌برداری تجاری از فرایند نورد باشد. این پژوهشگران همچنین در مقاله‌ای دیگر [24] عنوان کردند که

نورد می‌تواند به ریزساختار هم محور منجر شود، لذا این مورد همراه با کاهش تنش پسماند (شکل ۸) و اعوجاج متریال Ti–6Al-4V تولید شده با روش WAAM ثابت می‌کند که نورد می‌تواند ابزار مفیدی برای بهبود کیفیت قطعات ساخته شده از طریق روش تولید افزودنی باشد.

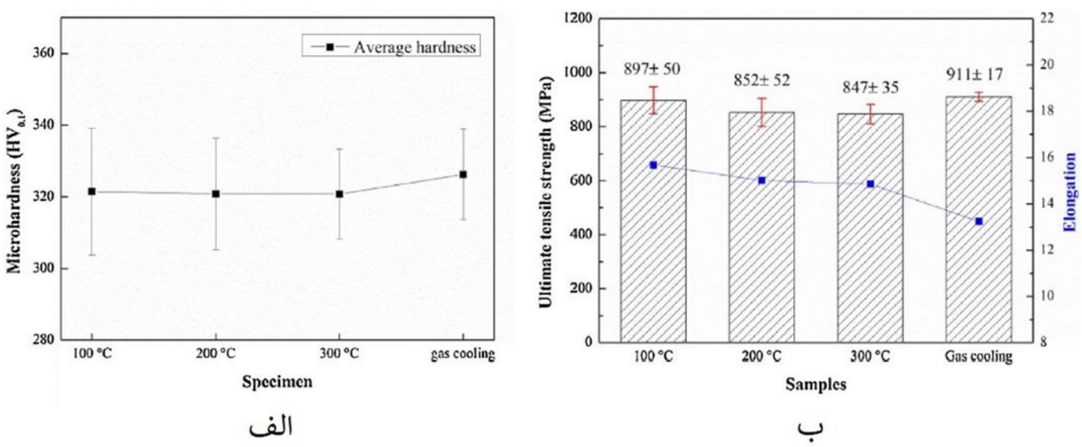
وو و همکارانش [27] نشان دادند که اگر از فرایند WAAM استفاده شود، گرادیان حرارتی لایه‌های رسوب‌گذاری و فرایند گرمایش و خنک‌سازی متناوب باعث می‌شود که قسمت هدف دارای تکامل ریزساختاری و خواص مکانیکی بهتر باشد که در شکل (۹) مشاهده می‌شود. تکنیک نورد سرد به طور قابل توجهی ناهمسانگردی ریزساختاری را از طریق تغییر شکل پلاستیکی شدید رسوبات کاهش می‌دهد. نورد سرد بین پاسی همچنین می‌تواند نقش مهمی در بهبود تخلخل هیدروژنی در قطعات آلومینیومی ساخته شده توسط WAAM ایفا کند. متریال‌های مختلفی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارتباط بین متریال‌ها و عیوب در فرایندهای WAAM مربوط به متریال‌های مختلف در شکل (۱۰) آورده شده است.



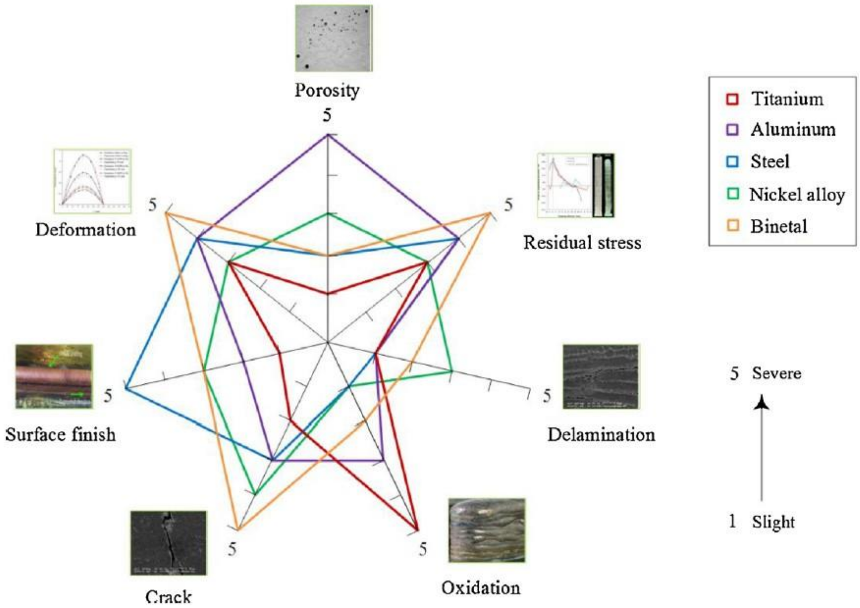
شکل ۷ متوسط میکرو سختی آلیاژ آلومینیوم ER2319 پرینت شده به روش WAAM نورد شده همراه با افزایش بار [25]



شکل ۸ نقشه کانتور تنش پسماند: a) کنترل نمونه‌های نورد شده با استفاده از غلتک پروفیلی با بارهای b) ۵۰ کیلو نیوتن و c) 75 کیلو نیوتن [24]



شکل ۹ خواص مکانیکی قطعه Ti6Al4V تولید شده توسط WAAM با خنک کننده میان پاسی با استفاده از گاز CO2 : الف) سختی و ب) استحکام کششی و ازدیاد طول [27]

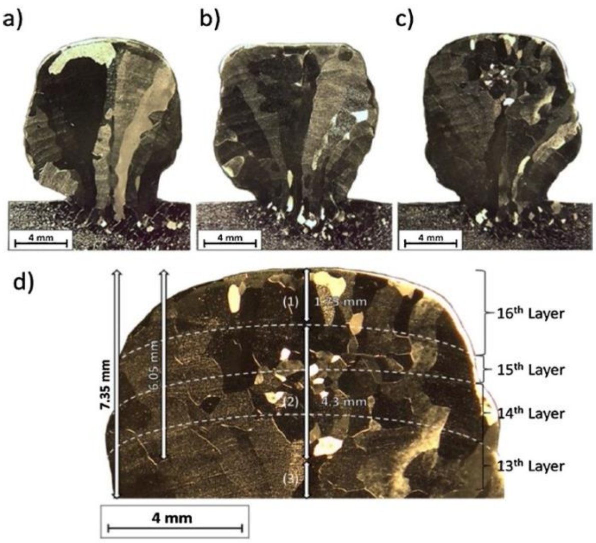


شکل ۱۰ ارتباط بین متریال‌ها و عیوب در فرایندهای WAAM [27]

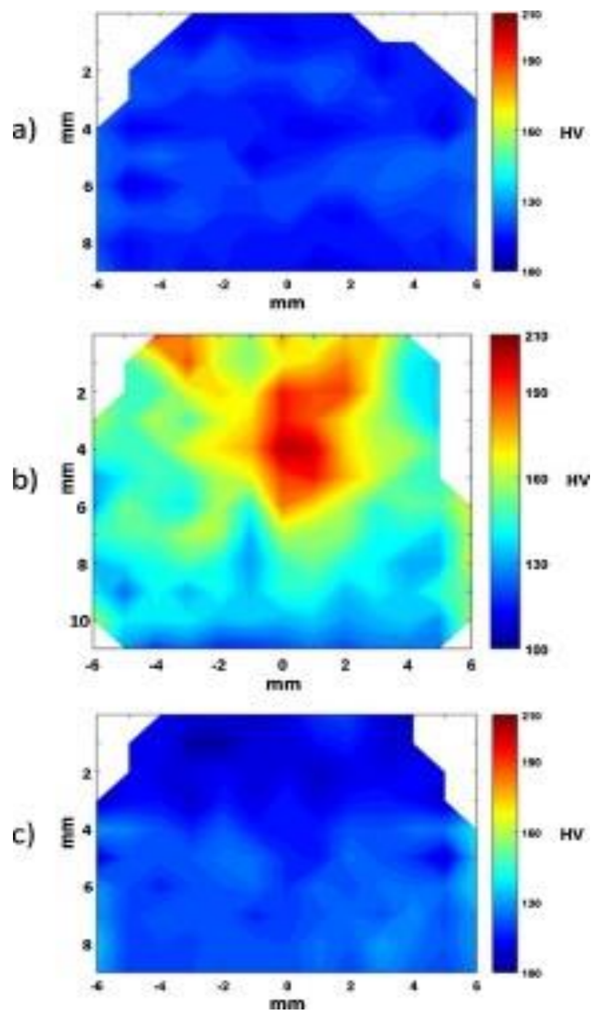
گیساریو و همکارانش [28] اشاره کردند که برای بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل، می‌توان نورد سرد را به طور مستقیم پس از رسوب مواد روی قطعه اعمال کرد. رودریگوز و همکارانش [21] نشان دادند که نورد بین لایه‌ای در متریال Ti-6Al-4V تولید شده به روش WAAM باعث بهبود ریز دانه‌های قبلی، کاهش ضخامت لایه‌های فاز آلفا و تغییر کلی ریزساختار از ستونی به هم محور می‌شود. همچنین نشان دادند که نورد بین لایه‌ای با افزایش بار نورد، اندازه و کمیت تخلخل را کاهش می‌دهد که دلیل افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیومی تولید شده به روش WAAM نورد شده است. کیو و همکارانش [29] نتیجه گرفتند که عملیات رسوب‌دهی پس از نورد گرم راهی مؤثر برای اصلاح قابل توجه ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی رسوبات آلیاژ A380 ساخته شده از طریق سیستم‌های ارزان قیمت فشار متوسط پاشش سرد است. در این پژوهش عملیات نورد گرم پس از پاشش رسوبات A380 با حرارت دادن آن‌ها در دمای ۵۰۰ درجه در کوره به مدت ۲ ساعت و سپس عملیات نورد یک طرفه با کاهش ضخامت‌های ۲۰ و ۴۰ درصد به ترتیب در ۱ و ۲ پاس انجام شد. متریال به کار گرفته شده در این پژوهش آلیاژ A380 است. ملکی و همکارانش [30] عنوان کردند که اگر پارامترهای مناسب برای عملیات نورد انتخاب شوند، این روش می‌تواند فرایند ریزدانه کردن را بهبود ببخشد و باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در لایه تحت عملیات قرار گرفته شود. این ویژگی‌ها می‌توانند منجر به بهبود خواص مکانیکی و همچنین کاهش زبری سطح شوند. استراتژی‌های مختلفی برای استفاده از نورد به منظور کنترل ریزساختار لایه‌ها بر روی فلزات AM مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان یک پاس نورد بر روی سطح خارجی/ لایه نهایی یا نورد بین پاسی را نام برد. متریال استفاده شده در این پژوهش از نوع Ti-6Al-4V می‌باشد. مارینلی و همکارانش [31] اشاره کردند که اجزای تولید شده به روش WAAM معمولا با دانه‌های ستونی بزرگ مشخص می‌شوند. این حالت را می‌توان با به‌کارگیری نورد سرد در فرایند کاهش داد. در واقع، تغییر شکل پلاستیک شدید در این فرایند منجر به کاهش اعوجاج و تنش‌های پسماند و اصلاح ریزساختاری می‌شود. در این تحقیق، نورد بین پاسی با بار ۵۰ کیلونیوتن بر روی یک سازه خطی تانتالیوم برای ارزیابی اثربخشی نورد در تغییر ساختار دانه از ستونی به هم‌محور و همچنین در اندازه ریزدانه‌ها انجام شد. اندازه دانه متوسط ۶۵۰ میکرومتر پس از پنج چرخه نورد بین پاسی و رسوب به دست آمد. هنگامی که لایه تغییر شکل یافته در طی رسوب بعدی دوباره گرم شد، تبلور مجدد رخ داد که منجر به رشد دانه‌های جدید بدون کرنش شد. عمق منطقه بهبود یافته مشخص شد و با مشخصات سختی ایجاد شده پس از نورد مرتبط گردید. علاوه بر این، یک بافت تصادفی پس از نورد تشکیل شد که باید به دستیابی به خواص مکانیکی همسانگرد کمک کند. در این پژوهش تأثیر نورد عمودی سرد با بار ۵۰ کیلونیوتن بر ریزساختار و سختی

بافت یک جزء تانتالیوم AM پس از هر مرحله از فرایند مورد مطالعه قرار گرفته است. سه نمونه اصلی مربوط به سه مرحله متوالی در این مطالعه این گونه بودند: به صورت رسوب (نمونه R۱)، به صورت رسوب + نورد (نمونه R۲)، به صورت رسوب + نورد + رسوب (نمونه R۳). در نمونه‌های مورد مطالعه، بار نورد اعمال شده باعث ایجاد یک کرنش فشاری در لایه‌های رسوب شده قبلی شد و میدان حرارتی رسوب بعدی اجازه تشکیل و رشد دانه‌های تبلور مجدد جدید را داد. تبلور مجدد در مرکز ساختار رسوب شده، جایی که اوج کرنش در آن قرار داشت و در عمق سه لایه زیر آخرین لایه رسوب شده رخ داد. مراحل پی در پی نورد و رسوب منجر به یک منطقه به تدریج بزرگ‌تر از دانه‌های هم‌محور با اندازه دانه متوسط ۶۵۰ میکرومتر پس از پنج مرحله نورد بین پاسی شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

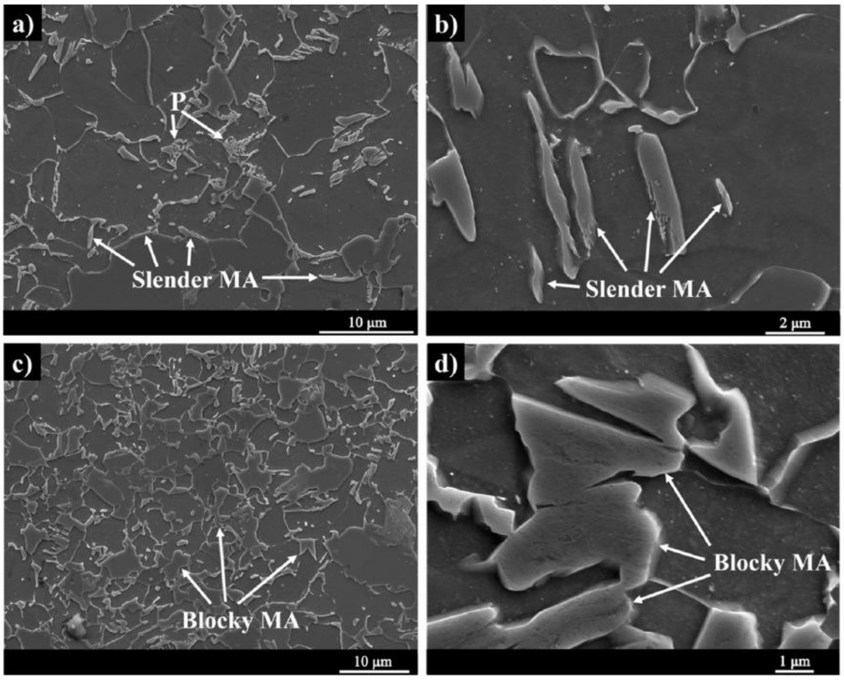
نمانی و همکارانش [32] در پـژوهش خـود امکـان‌سـنجی ساخت ورق فولادی کم آلیاژ کم کربن نـورد شـده (EH36) بـا فناوری WAAM با استفاده از فیلر ER70S را بررسـی کردنـد. پس از فرایند ساخت، چرخه‌های مختلف عملیـات حرارتـی، از جمله خنک‌سازی هوا و کوئنچ آب از دمای آستنیته بحرانی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، برای هر دو نمونه نـورد معمـولی و WAAM اعمـال شـد. ویژگـی‌هـای ریزسـاختاری و خـواص مکـانیکی ورق‌های کشتی ساخته شده با نورد و WAAM بـه طـور کامـل قبل و بعد از چرخه‌های مختلف عملیـات حرارتـی مشـخص و مقایسه شدند. هر دو عملیات حرارتی خنک کننده هوا و کوئنچ آب منجر بـه تشـکیل ترکیبـات سـخت مارتنزیـت آسـتنیت در ریزساختار ورق نورد شده گردیدند که منجر به افزایش سـختی و استحکام کششی و کاهش شکل‌پذیری قطعه می‌شود. از طرف دیگر، عملیات حرارتی خنک کننـده هـوا باعـث همگـن شـدن ریزساختار صفحه کشتی WAAM و باعث کاهش جزئی سختی و استحکام کششی شد، در حالی که چرخه کوئنچ آب منجر بـه تشکیل فریت سوزنی و پرلیت بـین دانـه‌ای و کمـک بـه بهبـود خواص مکانیکی قطعه شد که تمامی مراحل و حالـت‌هـای یـاد شده در شکل (۱۳) مشـاهده مـی‌شـوند. بنـابراین، یکپـارچگی مکانیکی مطلوب‌تر قطعه WAAM کوئنچ شده با آب در مقایسه با قطعـه نـورد شـده، امکـان سـاخت صـفحات کشـتی توسـط WAAM را تأیید کرد (شکل ۱۴).



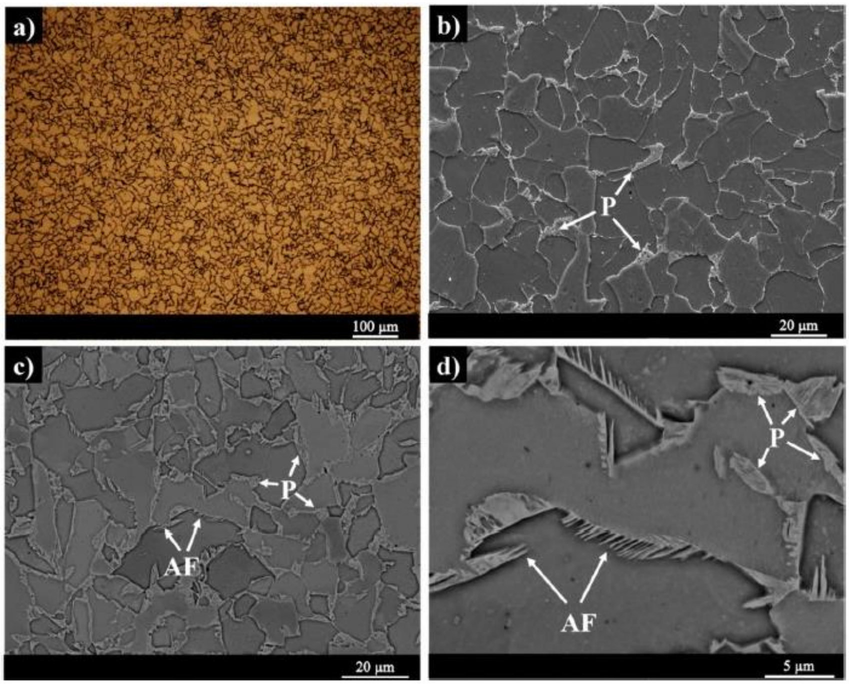
شکل ۱۱ میکروگراف‌های نوری نمونه‌های (a) R1، (b) R2 و (c) R3. بزرگ‌نمایی قسمت بالای تبلور مجدد نمونه (d) R3.[31]



شکل ۱۲ نقشه‌های کانتور مرتبط با اندازه‌گیری سختی ویکرز برای نمونه‌های (a) R1، (b) R2 و (c) R3 [31]



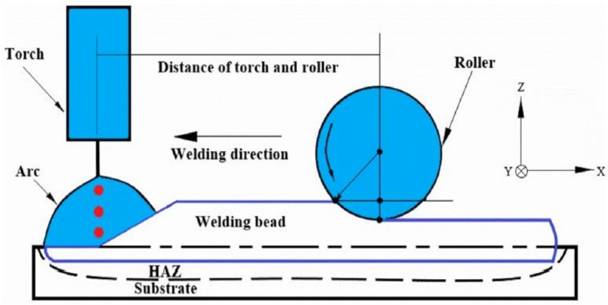
شکل ۱۳ میکروگراف‌های SEM از صفحه کشتی نورد شده پس از اعمال عملیات حرارتی مختلف: a) و b) چرخه خنک کنندگی توسط هوا و c) و d) چرخه کوئنچ کردن آب [32]



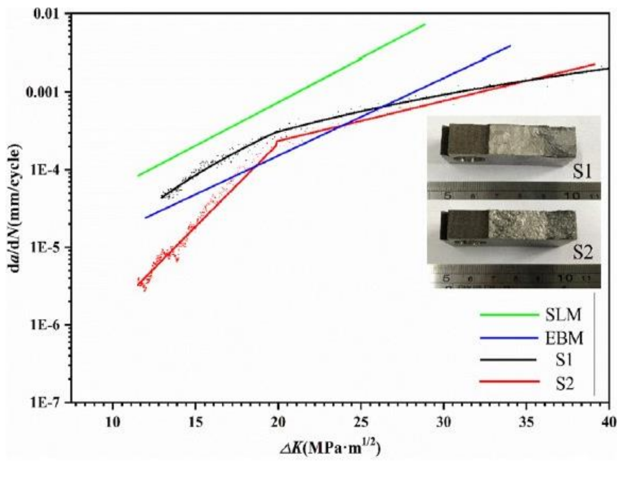
شکل ۱۴ میکروگراف‌های نوری و SEM که از نمونه WAAM پس از عملیات حرارتی مختلف از جمله: a) و b) چرخه خنک کنندگی هوا و c) و d) چرخه کوئنچ آب گرفته شده است (P: پرلیت، AF: آستنیت فریت) [32]

گائو و همکارانش [33] مقاومت رشد ترک خستگی و ریزساختار آلیاژهای TC4-DT ساخته شده توسط WAAM (نمونه)S1 و WAAM نورد شده در محل (نمونه S2) و به دنبال آن عملیات حرارتی را مقایسه کردند (شماتیک نمونه S2 در شکل ۱۵ آورده شده است). نمونه S2 دارای مقاومت در برابر رشد ترک خستگی بهتر بود که عمدتا به نقص‌های

ظریف‌تر و فاز ظریف‌تر آن مربوط می‌شود. اندازه بحرانی عیوب مربوط به عملکرد خستگی نیز محاسبه شد. اکثر عیوب در نمونه S2 کمتر از اندازه بحرانی بودند، در حالی که چندین نقص درشت در حدود ۱،۹۱ میلی متر در نمونه S1 مشاهده شد. ترک‌های ثانویه متعدد را می‌توان در نزدیکی سطح شکست در نمونه S2 شناسایی کرد که منجر به مسیرهای طولانی و پیچ در پیچ انتشار ترک خستگی می‌شود. می‌توانید چگونگی و نرخ رشد ترک خستگی در فرایندهای مختلف را در شکل (۱۶) مشاهده کنید. بنابراین، نورد در محل می‌تواند خواص خستگی آلیاژهای تیتانیوم ساخته شده توسط تولید افزودنی را بهبود بخشد.



شکل ۱۵ نمودار شماتیک فرایند WAAM همراه با نورد در ادامه فرایند [33]



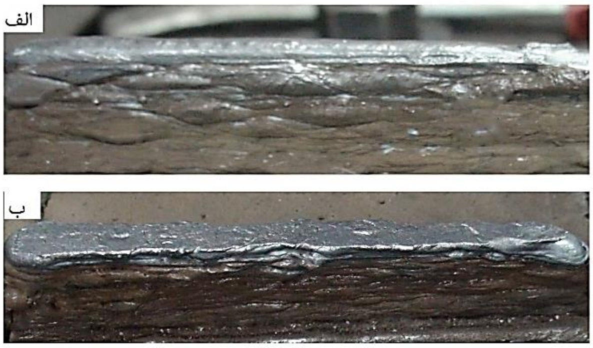
شکل ۱۶ نرخ رشد ترک خستگی نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم TC4-DT تولید شده توسط فرایندهای مختلف [33]

میشل و همکارانش [22] دریافتند در صورتی که هیچ نقصی در نمونه‌های حاصل از نورد حلقه‌ای ظاهر نشود، می‌توان به خواص مکانیکی خوبی برای بارگذاری استاتیکی دست یافت. به طور کلی، استراتژی جوشکاری باید بهبود داده شود تا از حفره‌ها و عدم وجود خطاهای ناشی از جوش جلوگیری شود، که در غیر این صورت ممکن است به صورت اتفاقی در فرایند WAAM ظاهر شوند و منجر به از دست دادن استحکام و شکل‌پذیری گردند. گو و همکارانش [25] تغییرات ناشی از عملیات حرارتی پس از ساخت و نورد بین پاسی با فشار بالا را با هدف افزایش استحکام قطعات ساخته شده به روش WAAM مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود یک دستگاه نورد نه چندان پیشرفته مربوط به دانشگاه کرانفیلد را برای فرایندهای نورد بین پاسی به کار گرفتند. کیو و همکارانش [29] در پژوهش خود رسوبات آلیاژی اسپری شده تحت عملیات نورد گرم با درصدهای مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های نورد گرم در مقایسه با حالت اسپری شده، استحکام و شکل‌پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند. ژنگ و همکارانش [20] نتیجه گرفتند که در مقایسه با تولید افزودنی معمول که یک فرایند رسوب آزاد است، قطعات ساخته شده به صورت ترکیبی از طریق رسوب‌دهی و نورد دارای سطوح بهتر و نوسان ابعاد بسیار کمتر هستند که مزایای صرفه‌جویی در زمان و مواد برای رسیدن به شکل نهایی قطعات بدون استفاده از ماشین‌کاری زیاد پس از تشکیل قطعه را شامل می‌شوند. میانگین ارتفاع و حداکثر خطای مطلق ارتفاع قطعات جدار نازک ۱۶ لایه در حالت بدون نورد افقی به ترتیب ۳۰/۸ میلی‌متر و ۲/۴ میلی‌متر به دست آمدند، در حالی که مقادیر برای حالتی که نورد انجام شد، ۲۵/۱ میلی‌متر و ۰/۲ میلی‌متر به دست آمدند. در حالت بدون نورد عمودی میانگین عرض بین ۸/۷۳ تا ۹/۱۴ میلی‌متر در نوسان بود و حداکثر مقدار خطای مطلق عرضی ۰/۴۵ میلی‌متر برای قطعات جدار نازک به دست آمد. در مقابل، برای حالتی که روی قطعه نورد انجام شد، میانگین عرض بین ۸/۶۷ و ۸/۷۸ میلی‌متر در نوسان بود و حداکثر مقدار خطای مطلق عرضی ۰/۱۲ میلی‌متر محاسبه گردید که تمامی این مقادیر در قالب جدول (۱) در زیر آورده شده است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز نماهای عرضی لایه‌ها با و بدون نورد افقی و عمودی آورده شده‌اند. همچنین در شکل (۱۹) خطای مطلق ارتفاع ماکزیمم قطعه جداره نازک با توجه به تعداد لایه‌های رسوب شده نمایش داده شده است.

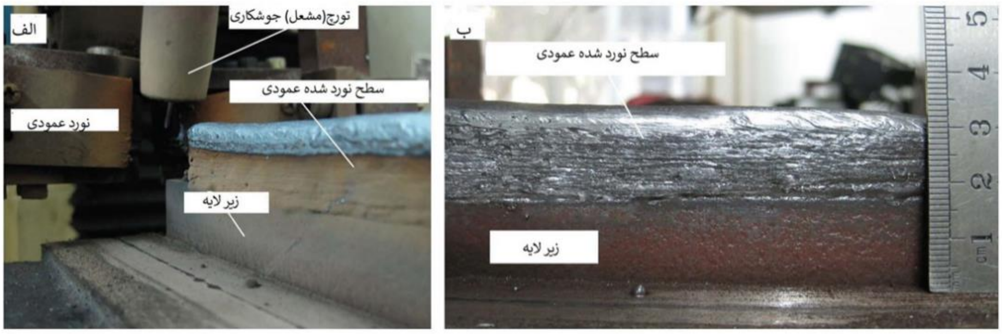
جدول ۱ تجزیه و تحلیل دقیق خطاها در خصوص لایه‌های رسوب شده با و بدون نورد عمودی [20]

Deposition layer	Average width (mm)		Maximum width absolute error (mm)		Mean square deviation (mm)	
	a*	b	a	b	a	b
First	8.73	8.67	0.36	0.06	0.14	0.03
Second	8.92	8.71	0.19	0.10	0.08	0.04
Fourth	8.83	8.76	0.33	0.12	0.13	0.02
Sixth	9.07	8.78	0.45	0.07	0.20	0.05
Eighth	9.14	8.70	0.42	0.04	0.18	0.02

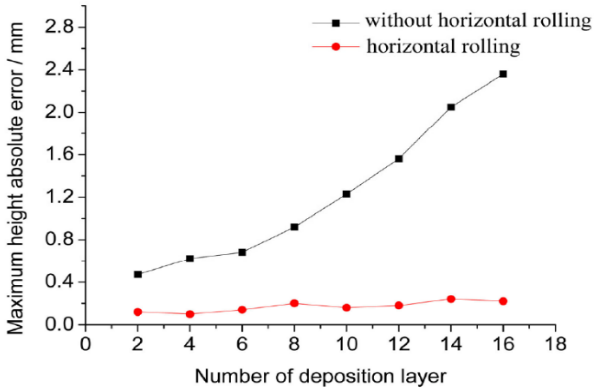
*a is the condition for the thin- walled parts without vertical rolling. b is the condition for the thin- walled parts with vertical rolling.



شکل ۱۷ تصاویر جداره نازک ۱۶ لایه با و بدون نورد افقی: الف) بدون نورد و ب) همراه با نورد [20]



شکل ۱۸ تصاویر قطعات جداره نازک نورد عمودی: الف) نمای جانبی قطعه جداره نازک با نورد و ب) نمای روبه‌روی قطعه جداره نازک با نورد [20]



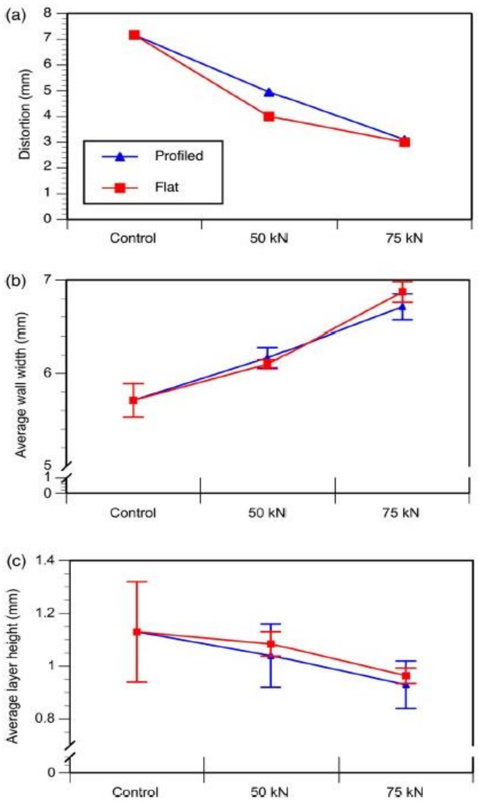
شکل ۱۹ خطای مطلق ارتفاع ماکزیمم قطعه جداره نازک [20]

اعوجاج و تنش پسماند

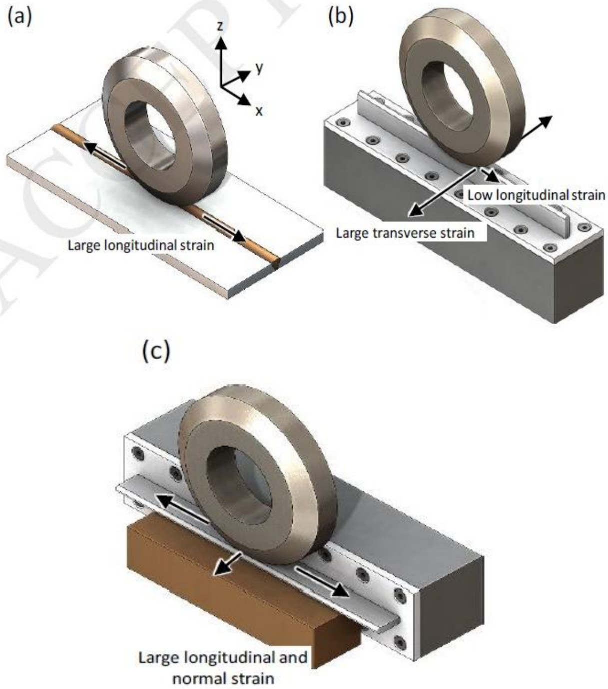
ژنگ و همکارانش [20] همان طور که پیش‌تر اشاره شد مشخص کردند که قطعات ساخته شده توسط رسوب‌دهی و نورد به صورت ترکیبی دارای سطوح مسطح و نوسان ابعاد بسیار کوچک‌تر هستند که یکی از مزایای آن دستیابی به شکل خالص قطعات با ماشین‌کاری کمتر است. یکی دیگر از مزیت‌های مهم این روش در خصوص فرایند ریزدانه‌سازی، کاهش تنش پسماند، جلوگیری از ترک داغ و بهبود خواص مکانیکی است. گو و همکارانش [25] نشان دادند که اگر چه خاصیت استحکام آلیاژ پس از عملیات حرارتی قطعا بهبود

می‌یابد؛ با این حال مشکل اصلی کنترل اعوجاج است. بنابراین نورد سرد بین پاسی را نیز به فرایند اعمال کردند، که توانست به طور قابل توجهی حداکثر تنش پسماند را کاهش دهد، بنابراین به کمک این روند می‌توان اعوجاج را کاهش داد و یا حتی حذف نمود. مارتینا و همکارانش [26] نشان دادند که نورد فشار بالا که در اصل برای فرایند جوشکاری می‌باشد، یک روش کشش مکانیکی در محل تولید است که در آن بار با یک غلتک متحرک اعمال می‌شود. اگر بار برای فشرده‌سازی پلاستیک شدید سطح در جهت نرمال کافی باشد، کشش پلاستیک در جهت غلتش رخ می‌دهد، و در نتیجه تنش‌های پسماند طولی کاهش می‌یابند. همچنین آن‌ها در پژوهشی دیگر [24] نورد فشار بالا را به هر لایه از یک قطعه تولید شده با متریال Ti-6Al-4V به روش WAAM به صورت بین پاسی اعمال کردند. در نمونه‌های نورد شده، اعوجاج خارج از صفحه کمتر از نصف شد (شکل ۲۰). همچنین با استفاده از روش کانتور اندازه‌گیری تنش‌های پسماند نتیجه‌گیری کردند که اگر چه نمونه‌ها هنوز تنش‌های کششی تا حدود ۵۰۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهند، بزرگی آن‌ها ۶۰ درصد کاهش می‌یابد، به ویژه در سطح مشترک بین رسوب و بستر. بر اساس نتایج به دست آمده از این مقاله نورد بین پاسی در کاهش تنش پسماند طولی موفق بود. نورد منجر به تنش‌های فشاری بالاتر در نزدیکی بالای سطح قطعه شد.

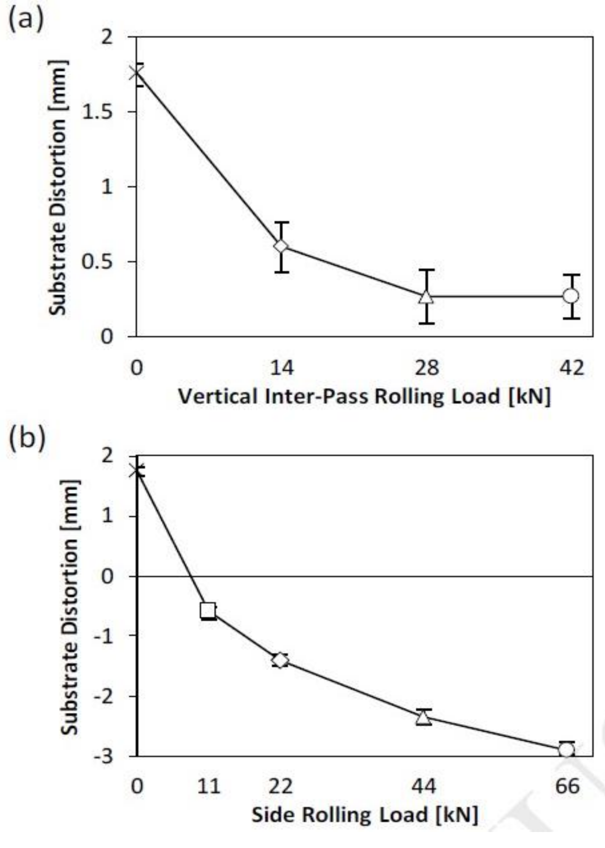
ویلیامز و همکارانش [34] نشان دادند که کرنش ایجاد شده توسط یک پاس نورد منجر به کاهش تنش پسماند می‌شود. همچنین مشخص شد در حالی که نمونه رول نشده ماکزیمم تنش ۶۰۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد، تنش ماکزیمم قطعات نورد شده در وضعیت اعمال ۵۰ کیلو نیوتن، ۳۰۰ مگاپاسکال است. غلتک شکاف‌دار، که محدودیت‌های بیشتری را به فرایند تحمیل می‌کند، منجر به یک کرنش بیشتر در جهت طولی شد و ماکزیمم تنش را به ۲۵۰ مگاپاسکال کاهش داد. متریال مورد تحلیل در این مقاله Ti-6Al-4V و فرایند مورد استفاده WAAM می‌باشد. وو و همکارانش [27] ثابت کردند که نورد بین پاسی که پس از تکمیل هر لایه رسوب انجام می‌شود، می‌تواند باعث کاهش تنش‌های پسماند و اعوجاج شود. نورد سرد بین پاسی نه تنها تنش پسماند را کاهش می‌دهد، بلکه خواص مواد همگن بیشتری را به همراه دارد. هانیگ و همکارانش [35] اشاره کردند که نورد می‌تواند تنش و اعوجاج باقی مانده را در قطعات آلومینیومی ساخته شده با روش WAAM کنترل کند. نورد در این پژوهش هم به صورت عمودی روی هر لایه رسوبی (بین پاسی) و هم بعد از تکمیل رسوب اعمال شد. اعوجاج عملا با روش بین پاسی عمودی بر خلاف سایر فلزات حذف شد و با نورد جانبی معکوس شد. نورد بین پاسی عمودی اعوجاج را حذف می‌کند، اما منجر به ایجاد یک میدان تنش چند جهته با تنش‌های فشاری به عمق تقریبا ۲ mm زیر سطح و تنش کششی هیدرواستاتیک به عمق ۱۰–۵ mm زیر سطح می‌شود. تمامی حالت‌های نورد انجام شده در این پژوهش را در شکل (۲۱) مشاهده می‌کنید. اعوجاج در قطعات ساخته شده نامتقارن می‌تواند قابل توجه باشد، اما به دلیل استحکام تسلیم پایین در حالت رسوب برای آلیاژ آلومینیوم، عموما کمتر از سایر فلزات است. نورد عمودی بین پاسی تنش پسماند در قطعات آلومینیوم تولید شده WAAM را اصلاح می‌کند و برخلاف تحقیقات قبلی برای دیواره‌های Ti-6Al-4V و فولاد کم کربن می‌تواند اعوجاج را از بین ببرد (شکل ۲۲). نتایج این پژوهش پس از بررسی اثر نورد بین پاسی عمودی و نورد جانبی پس از رسوب بر روی ۲۳۱۹ دیواره آلومینیومی تولید شده به روش WAAM آورده شده است.



شکل ۲۰ (a) اعوجاج، (b) میانگین عرض دیواره و (c) ارتفاع لایه در برابر بار نورد. توجه داشته باشید که نوارهای خطا در (b) و (c) نشان دهنده انحراف معیار سه اندازه‌گیری انجام شده هستند [24]



شکل ۲۱ جهت‌های اصلی کرنش به کمک فرایند نورد سرد: a) نورد عمودی جوش‌های لب به لب. b) نورد عمودی دیواره WAAM و c) نورد جانبی دیواره WAAM [35]

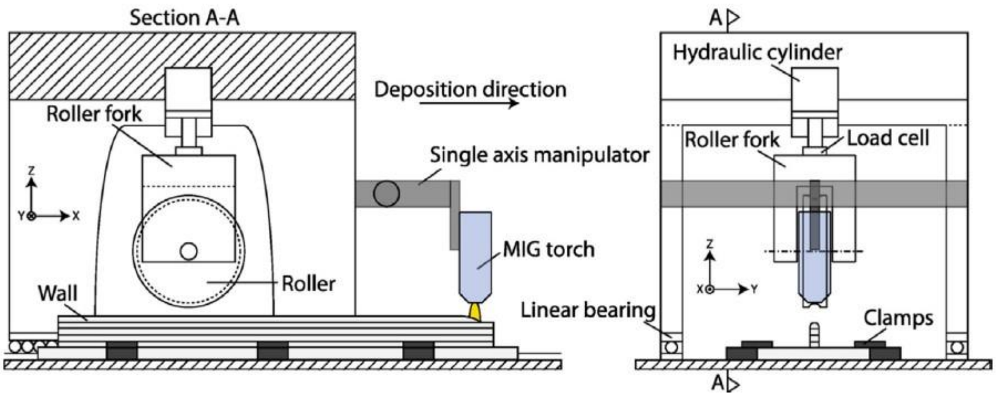


شکل ۲۲ کاهش اعوجاج خارج از صفحه D نمونه کنترل با (a) نورد عمودی بین پاسی و (b) نورد جانبی [35]

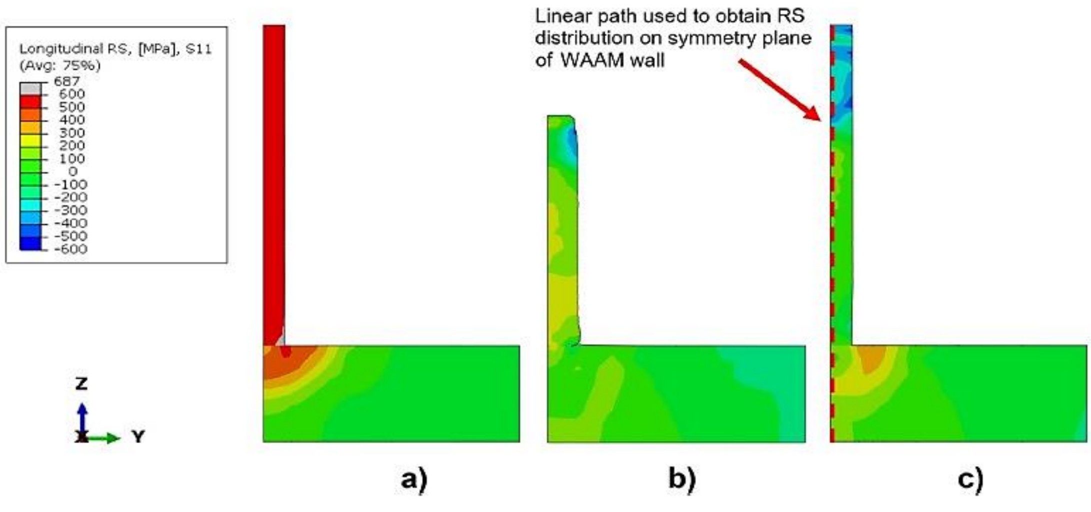
گیساریو و همکارانش [28] عنوان کردند که به دلیل گرمای زیاد تولید شده توسط قوس، اجزای تولید شده به کمک روش WAAM در معرض اعوجاج و تنش پسماند هستند. اگر اعوجاج‌ها (هم کمانش و هم خمش) به طور مؤثر در طول ساخت مدیریت شوند، می‌توان با استفاده از عملیات حرارتی، تنش پسماند را از بین برد. به طور کلی، در فرایند کار سرد از طریق نورد فشار بالا می‌توان به کاهش تنش در چنین قطعات بزرگی کمک کرد، اما در هر صورت، به کارگیری یک عملیات حرارتی استاندارد برای این فرایند ضروری است. آن‌ها همچنین عنوان کردند که مزایای فرایند نورد سرد بسیار شبیه به نتایج مثبتی است که از طریق فرایند شات پینینگ به دست می‌آید، به شکلی که کره‌های کوچکی که به سطح برخورد می‌کنند تنش‌های کششی را کاهش می‌دهند و گاهی اوقات تنش‌های فشاری به جای آن ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر، نورد می‌تواند تنش فشاری را به طور مداوم ایجاد کند و تغییر شکل پلاستیک شدید کل مقطع جوش را پوشش دهند. می‌توان به کمک آزمایش‌های نورد سرد پرفشار در طول ساخت قطعات بزرگ با استفاده از WAAM نتیجه گرفت که این سیستم می‌تواند تنش‌های پسماند ماکزیمم را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و این اثر را در سطح مقطع مواد رسوب شده گسترش دهد. اعوجاج حاصل در جهت طولی نیز کاهش می‌یابد. گورنیاکف و همکارانش [36] اشاره کردند که فرایند ترکیبی WAAM و نورد فشار بالا می‌تواند اجزایی در مقیاس بزرگ با تنش پسماند زیاد و اعوجاج ایجاد کند. در این مقاله یک مدل فرایند ترکیبی کارآمد برای یک دیواره فولادی مطابق با شکل ۲۳ ارائه شده است تا فرایند رسوب WAAM و نورد را شبیه‌سازی کند. توزیع تنش پسماند پیش‌بینی شده و ابعاد دیواره به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارند. تغییرات چرخه‌ای کشش طولی تنش پسماند در طول رسوب WAAM و نورد بین لایه‌ای در شرایط ثابت شده رخ می‌دهند. عمق نفوذ رسوب و نورد با تعداد لایه‌های زیرینی که پس از هر چرخه فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌دهند، مشخص می‌شود. برای نورد بین لایه‌ای با یک غلتک مسطح، نورد عمق نفوذ کمتری نسبت به رسوب دارد. در نتیجه، نورد تنش پسماند کششی WAAM پس

از چرخه‌های حرارتی را حذف نمی‌کند، بلکه به بازسازی آن‌ها می‌پردازد. فرایند نورد با یک غلتک شکاف‌دار باعث ایجاد کرنش پلاستیکی کششی بیشتری می‌شود و در نتیجه به طور مؤثرتری تنش پسماند کششی و اعوجاج غیر ثابت را کاهش می‌دهد. در مقایسه با نورد بین لایه‌ای، نورد به صورت چهار لایه، رسوبات عمق نفوذ بیشتری دارد و از این رو کارایی کاهش تنش پسماند مشابه با نورد بین پاسی را با تعداد نورد کمتر نتیجه می‌دهد (شکل ۲۴)؛ در حالی که نورد پس از ساخت به دلیل نفوذ ناکافی، کارایی پایین‌تری دارد. بنابراین، روش نورد لایه‌های انباشته با رولر شکاف‌دار برای حالت ترکیبی WAAM و نورد توصیه می‌شود.

کم [37] در پژوهش خود اشاره می‌کند که نورد بین پاسی فشار بالا تنش پسماند و اعوجاج را در قطعات آلیاژ آلومینیوم تولید شده با روش WAAM کاهش می‌دهد. با این فرایند، تخلخل ایجاد شده در قطعات آلیاژی تولید شده با WAAM نیز می‌تواند کاهش یافته یا حذف شود و استحکام و شکل‌پذیری افزایش یابد. این فرایند نورد سرد همچنین کیفیت سطح محصول را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، نورد سرد بین پاسی نه تنها تنش‌های پسماند و اعوجاج را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق تغییر شکل پلاستیک شدید، خواص مواد را همگن‌تر می‌کند، به عبارت دیگر، ناهمسانگردی را از بین می‌برد. با این حال، به دلیل محدودیت هندسی فرایند نورد، این تکنیک تنها برای قطعات ساده مانند دیواره‌های مستقیم مناسب است.



شکل ۲۳ طرح تجهیزات آزمایشی و راه‌اندازی برای فرایند رسوب و نورد WAAM [36]



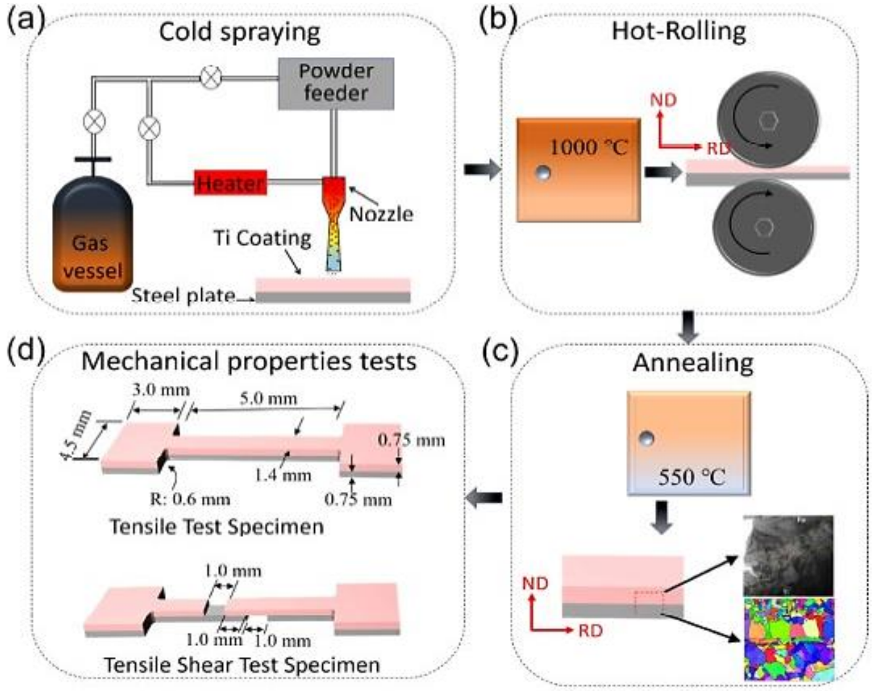
شکل ۲۴ توزیع تنش پسماند طولی در دیواره رسوب شده WAAM با گیره‌های فعال: الف) فقط رسوب WAAM، ب) رسوب WAAM + نورد بین پاسی با استفاده از غلتک تخت، ج) رسوب WAAM + نورد بین پاسی با استفاده از غلتک شکاف‌دار [36]

هندسه ذرات

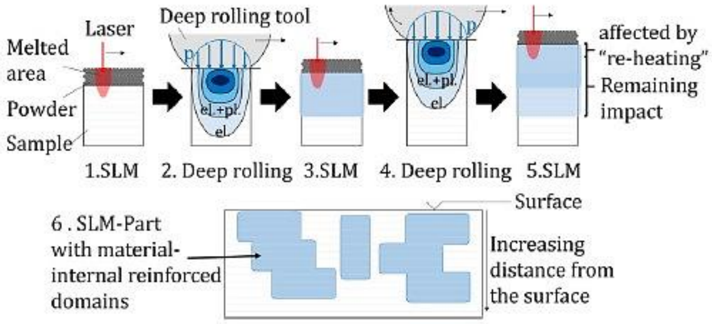
مارتینا و همکارانش [24] در پژوهش خود نورد فشار بالا را به هر لایه از یک جزء تولید شده Ti-6Al-4V با روش WAAM به صورت بین پاسی اعمال کردند. در نمونه‌های نورد شده، تغییری در هندسه رسوبات به دلیل تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد که منجر به افزایش عرض دیواره و کاهش ارتفاع لایه شد. انحراف استاندارد ارتفاع لایه به طور قابل توجهی با نورد کاهش یافت و فرایند WAAM را آسان‌تر کرد. رودریگوز و همکارانش [21] عنوان کردند که نورد سرد برای کنترل عرض قطعات و در نتیجه بهبود پوشش سطح هندسه نهایی نیز می‌تواند استفاده شود.

مواد ترکیبی و مفاهیم نوین

ژائو و همکارانش [38] در سال ۲۰۱۹ یک رویکرد نوآورانه برای ساخت صفحات روکش شده تیتانیم/فولاد را مورد بررسی قرار دادند. به جای استفاده از ورق‌های Ti، پودر تیتانیم خالص در ابتدا با استفاده از روش تولید افزودنی اسپری سرد (CSAM) روی صفحات فولادی به صورت رسوب قرار گرفت. سپس صفحات روکش تیتانیم/فولاد کاملا به هم کوپل شده از طریق عملیات نورد گرم و آنیلینگ به دست آمدند. خواص مکانیکی این صفحات در مراحل مختلف تولید با انجام یک سری آزمایش کشش و برش مورد ارزیابی قرار گرفتند. مشخص شد که صفحات روکش تیتانیم/فولاد دارای استحکام برشی عالی ۲۸۰ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۵۶۴ مگاپاسکال و ازدیاد طول مناسب ۱۸٪ بودند. بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با روش‌های SEM، EBSD و TEM انجام شد. مشخص شد که پاشش سرد پیوند خوبی از Ti با صفحه فولادی ایجاد می‌کند و در نتیجه ترک‌خوردگی و اکسیداسیون را در سطح مشترک مهار می‌کند. عملیات نورد گرم منافذ/عیوب پوشش تیتانیوم اسپری شده را ترمیم کرده و منجر به پیوند متالورژیکی بین ذرات Ti و همچنین رابط Ti/فولاد می‌شود که به طور قابل توجهی استحکام را بهبود می‌بخشد. عملیات نورد منجر به تشکیل ترکیبات جدید (به عنوان مثال FeTi و TiC) در سطح مشترک شد. در نهایت، عملیات بازپخت منجر به بازیابی و تبلور مجدد تیتانیم و قطعات فولادی سطح مشترک شد که نه تنها چگالی نابه‌جایی/کرنش‌های موضعی را در نمونه آنیل شده کاهش داد، بلکه باعث رشد ترکیبات شکننده (FeTi و TiC) شد که منجر به مقادیر استحکام کششی نهایی ۵۶۴ مگاپاسکال و مقاومت برشی ۲۸۰ مگاپاسکال و ازیاد طول بالاتر ۱۸٪ شد. طرح شماتیک این فرایند را درشکل (۲۵) ملاحظه می‌کنید.



شکل ۲۵ نمایش شماتیک (a) پاشش سرد Ti بر روی صفحه فولادی، (b) فرایند نورد گرم، (c) فرایند بازپخت و (d) ابعاد نمونه برای آزمایش‌های کشش و برش [38]



شکل ۲۶ شماتیک فرایند تولید به روش SLM همراه با نورد عمیق میانی [39]

میر و ویلکی [39] در سال ۲۰۱۹ مفهوم جدیدی را برای یکپارچه‌سازی پرداخت مکانیکی سطح در فرایند ساخت افزودنی ارائه کردند. فرایند ساخت به صورت لایه لایه با استفاده از روش ذوب لیزری انتخابی (SLM) امکان دسترسی به لایه‌ها قبل از ادامه افزودن لایه‌های بعدی در بالای سطوح پرداخت شده مکانیکی را فراهم می‌کند. از نورد عمیق برای افزایش یکپارچگی سطح تا عمق چندین لایه تا ضخامت mm ۴۵۰ در فرایند SLM بهره گرفته می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکپارچگی مجدد سطح نورد شده در فرایند SLM باعث ایجاد ناسازگاری نمی‌شود. رویکرد کلی این پژوهش نشان داد یکپارچگی پرداخت مکانیکی سطح در فرایندهای ساخت افزودنی تنها به روش SLM محدود نمی‌شود. شکل (۲۶) شماتیک فرایند تولید به روش SLM همراه با نورد عمیق را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در مقاله مروری حاضر پژوهش‌های انجام شده در خصوص تأثیر فرایند نورد بر خواص مکانیکی، ریزساختار، تنش پسماند و رشد ترک در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی بررسی شده و فرایند مختلف هیبریدی پرینت سه‌بعدی ـ نورد معرفی و ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش به طور خلاصه در ادامه بیان شده است:

۱. با انجام فرایند نورد استحکام قطعات پرینت سه‌بعدی شده افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود استحکام کششی قطعات افزایش یافته و انعطاف‌پذیری آن‌ها کاهش یابد.

۲. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که فرایند نورد می‌تواند در خصوص ریزدانه کردن و بهبود ریزساختار مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی و تبدیل آن از حالت کاملا ستونی به هم محور مؤثر بوده و تا حدودی عیوب ساختاری و تخلخل موجود در ساختار را کاهش دهد.

۳. روش‌های مختلف نورد به خصوص روش نورد فشار بالا و نورد بین پاسی می‌توانند تنش پسماند و اعوجاج را در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی تا میزان قابل توجهی کاهش دهند.

۴. در مقایسه با روش‌های ساخت افزایشی معمول، قطعات ساخته شده به صورت ترکیبی از طریق رسوب‌دهی و نورد دارای کیفیت سطح بهتر، هندسه مسطح‌تر و نوسان ابعادی بسیار کمتری هستند.

۵. طراحی غلتک‌ها نقش مهمی در روش نورد بین لایه‌ای ایفا می‌کند و هندسه قرارگیری غلتک‌ها باید با توجه به ویژگی‌های قطعه طراحی شود تا بتواند خواص مطلوب مورد نظر را در قطعات پرینت سه‌بعدی شده ایجاد نماید.

۶. روش هیبریدی ساخت افزایشی ـ نورد برای ریزدانه کردن، جلوگیری از تشکیل عیوب مانند ترک و بهبود خواص مکانیکی و قطعات مؤثر و مفید است و سبب کاهش اعوجاج و تنش پسماند در قطعات تولیدی به روش پرینت سه‌بعدی می‌گردد.

واژه‌نامه

نورد	rolling
ساخت افزایشی	additive manufacturing
اعوجاج	distortion
تنش پسماند	residual stress
ناهمسانگردی	anisotropy
ریزدانه سازی	grain refinement
افزایش طول (کشیدگی)	elongation
غلتک	roller

تبلور مجدد recrystallization
نورد نامتقارن asymmetric rolling
پراش الکترونی Electron Back-Scatter Diffraction (EBSD)
گسترش جهت‌گیری دانه‌ها Grain Orientation Spread (GOS)
الیاف texture
نورد سریع دیفرانسیلی Differential Speed Rolling (DSR)
پرس در کانال مساوی زاویه‌دار Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)
نورد تجمعی Accumulative Roll Bonding (ARB)
نوار برشی shear band
نورد نامتقارن بهبود یافته Improved Asymmetric Rolling (ASR)
مرز زاویه‌دار high-angle boundary
پراش پرتو ایکس X-Ray Diffraction (XRD)
فرایند نورد سطحی اولتراسونیک Ultrasonic Surface Rolling Process (USRP)
تغییر شکل پلاستیک شدید Severe Plastic Deformation
فرایند پینینگ اولتراسونیک Ultrasonic Impact Peening (UIP)
نورد عمیق Deep Rolling (DP)
هم‌محور equiaxed
لایه‌ای lamellar
پیری aging
نورد با نرخ کرنش بالا High Strain Rate Rolling (HSRR)
بارش دینامیکی Dynamic Precipitation (DP)
ذوب القایی خلأ Vacuum Induction Melting (VIM)
چگالی نابه‌جایی dislocation density
تولید افزایشی سیم و قوس Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)
پراش برگشتی الکترون Electron BackScatter Diffraction (EBSD)
نورد حلقه‌ای ring rolling
ساخت افزودنی به روش نورد اصطکاکی Friction-Rolling Additive Manufacturing (FRAM)
روش تولید افزودنی اسپری سرد Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM)
ذوب لیزری انتخابی Selective Laser Melting (SLM)
رولر(غلتک) شکاف‌دار slotted roller
همگن homogenous
جداره نازک thin wall
بین پاسی interpass
گرادیان حرارتی thermal gradient

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز از این پژوهش، در قالب پژوهانه (SCU.EM1402.73332) تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

[1] Y. Zhi, X. Wang, S. Wang, X. Liu, "A review on the rolling technology of shape flat products" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 4507-4518, (2018). https://doi.org/10.1007/s00170-017-1004-8.

[2] J. G. Lenard, *Primer on flat rolling*. Newnes, (2013). [E-book] Available: Google e-book.

[3] W. J. Kim, J. B. Lee, W. Y. Kim, H. T. Jeong, and H. G. Jeong, "Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling" *Scripta Materialia*, vol. 56, no. 4, pp. 309-312, (2007).

[4] W. Kim, J. Park, and W. Kim, "Effect of differential speed rolling on microstructure and mechanical properties of an AZ91 magnesium alloy" *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, no. 1-2, pp. 289-293, (2008).

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.06.050.

[5] W. J. Kim, S. J. Yoo, J. Lee, "Microstructure and mechanical properties of pure Ti processed by high-ratio differential speed rolling at room temperature" *Scripta Materialia*, vol. 62, no. 7, pp. 451-454, (2010). https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.12.008.

[6] J. Jiang, Y. Ding, F. Zuo, and A. Shan, "Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling" *Scripta Materialia*, vol. 60, no. 10, pp. 905-908, (2009). https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.016.

[7] Z. Li, L. Fu, B. Fu, A. Shan, "Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 558, pp. 309-318, (2012). https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.005.

[8] X. Huang, K. Suzuki, N. Saito, "Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy sheet processed by differential speed rolling" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 508, no. 1-2, pp. 226-233, (2009). https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.052.

[9] M. John, et al. and P. L. Menezes, "Ultrasonic surface rolling process: Properties, characterization, and applications" *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, p. 10986, (2021). https://doi.org/10.3390/app112210986.

[10] N. D. Stepanov, A. V. Kuznetsov, G. A. Salishchev, G. I. Raab, and R. Z. Valiev, "Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of copper subjected to ECAP with various numbers of passes" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 554, pp. 105-115, (2012). https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.022.

[11] S. Kheiri, H. Mirzadeh , M. Naghizadeh, "Tailoring the microstructure and mechanical properties of AISI 316L austenitic stainless steel via cold rolling and reversion annealing" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 759, pp. 90-96, (2019). https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.028.

[12] R. Ran, et al. and G. D. Wang, "Microstructure, precipitates and mechanical properties of Inconel718 alloy produced by two-stage cold rolling method" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 793, p. 139860, (2020). https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139860.

[13] C. Chen, J. Chen, H. Yan, B. Su, M. Song, S. Zhu, "Dynamic precipitation, microstructure and mechanical properties of Mg-5Zn-1Mn alloy sheets prepared by high strain-rate rolling" Materials & Design, vol. 100, pp. 58-66, (2016). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.129.

[14] L. He, Y. Liu, J. Li, B. Li, "Effects of hot rolling and titanium content on the microstructure and mechanical properties of high boron Fe–B alloys" *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 36, pp. 88-93, (2012). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.043.

[15] B. Wang, X. H. Chen, F. S. Pan, J. J. Mao, Y. Fang, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 8, pp. 2481-2489, (2015). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63866-3.

[16] A. Hedayati, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, F. Forouzan, "The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 8, pp. 1017-1022, (2010). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.

[17]S. K. Panigrahi and R. Jayaganthan, "Effect of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of 6063 Al alloy" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 492, no. 1-2, pp. 300-305, (2008). https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.03.029.

[18]M. Jahazi and B. Egbali, "The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel" *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 2, pp. 276-279, (2000). https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00474-X.

[19]L. Van Long, D. Van Hien, N. T. Thanh, N. C. Tho, V. T. Do, "Impact of Cold‐ Rolling and Heat Treatment on Mechanical Properties of Dual‐ Phase Treated Low Carbon Steel" *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 1674837, (2020). https://doi.org/10.1155/2020/1674837.

[20]H. Zhang, D. Ruia, Y. Xiea, G. Wangb, "Study on Metamorphic Rolling Mechanism for Metal Hybrid Additive Manufacturing", (2013). Available: https://hdl.handle.net/2152/88490.

[21]T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. Miranda, T. G. Santos, J. Oliveira, "Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)" *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1121, (2019). https://doi.org/10.3390/ma12071121.

[22]D. Michl, B. Sydow, M. Bambach, "Ring rolling of pre-forms made by wire-arc additive manufacturing" *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. 342-348, (2020). https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.275.

[23]R. Xie, Y. Shi, R. Hou, H. Liu, and S. Chen, "Efficient depositing aluminum alloy using thick strips through severe deformation-based friction rolling additive manufacturing: processing, microstructure, and mechanical properties" *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 3788-3801, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.075.

[24]F. Martina, et al. and M. Hofmann, "Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components" *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 1439-1448, (2016). https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1142704.

[25]J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. W. Williams, Y. Zhai, "Wire+ arc additive manufacturing of aluminum" *Conference Proceedings and Journals*,(2014). Available: https://hdl.handle.net/2152/88764.

[26]F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, J. Meyer, "Microstructure of interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components" *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 46, no. 12, pp. 6103-6118, (2015).https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1.

[27]B. Wu, Z. Pan, *et al.* and J. Norrish, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement" *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 127-139, (2018). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

[28]A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya, "Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review" *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 53, pp. 124-149, (2019). https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005.

[29]X .Qiu, *et al* and T. Y. Xiong, "In-situ Si_p/A380 alloy nano/micro composite formation through cold spray additive manufacturing and subsequent hot rolling treatment: microstructure and mechanical properties" *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 780, pp. 597-606, (2019). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.399.

[30]E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities" *Additive Manufacturing*, vol. 37, p. 101619, (2021). https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101619.

[31]G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams, "Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining Wire+ Arc additive manufacturing and vertical cold rolling" *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101009, (2020). https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101009.

[32]A. V. Nemani, M. Ghaffari, A. Nasiri, "Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing" *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101086, (2020). https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101086.

[33]Y. Gao *et al.*, "Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing" *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 1395-1407, (2021). https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.152.

[34]S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, "Wire+ arc additive manufacturing" *Materials science and technology*, vol. 32, no. 7, pp. 641-647, (2016). https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073.

[35]J. R. Hönnige, P. A. Colegrove, S. Ganguly, E. Eimer, S. Kabra, S. Williams, "Control of residual stress and distortion in aluminium wire+ arc additive manufacture with rolling" *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 775-783, (2018). https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.015.

[36]V. Gornyakov, Y. Sun, J. Ding, and S. Williams, "Modelling and optimising hybrid process of wire arc additive manufacturing and high-pressure rolling" *Materials & Design*, vol. 223, p. 111121, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111121.

[37]G. Çam, "Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM)" *Materials Today*, vol. 62, no. 1, pp. 77-85, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137.

[38]Z. Zhao, *et al.* and T. Xiong, "Microstructural evolutions and mechanical characteristics of Ti/steel clad plates fabricated through cold spray additive manufacturing followed by hot-rolling and annealing" *Materials & design*, vol. 185, p. 108249, (2020). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108249.

[39] D. Meyer and N. Wielki, "Internal reinforced domains by intermediate deep rolling in additive manufacturing" *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 579-582, (2019). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.012.